

SYSTEMS SCIENCE

系统科学

主 编 ● 许国志

副主编 ● 顾基发 车宏安



上海科技教育出版社

系 统 科 学

主编 许国志

副主编 顾基发 车宏安

上海科技教育出版社

532

图书在版编目(CIP)数据

系统科学/许国志主编. —上海:上海科技教育出版社,
2000.9

ISBN 7-5428-2355-8

I.系...

II.许...

III.系统科学...

IV.N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 36511 号

责任编辑 潘涛 装帧设计 汤世梁

系统科学

主编 许国志

副主编 顾基发 车宏安

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号 邮政编码 200233)

各地新华书店经销 上海新华印刷厂印刷

2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-5428-2355-8/N·373

开本 787×1092 1/18 印张 24.5 插页 2 字数 446 000

印数 1-3 000 定价 39.60 元

内容简介

本书是在总结我国二十多年来开展系统科学和系统工程研究、应用、教学的基础上编写的,并在全国范围广泛征求意见,反映了同行的共识性认识。本书全面介绍了系统科学的基础理论、应用理论和工程应用,重点是基础理论的内容。本书系统阐述了对各类系统的结构、功能和演化有普适意义的动力学系统理论(包括分岔、混沌等)、自组织理论、随机性理论,以及简单巨系统、复杂适应系统、开放的复杂巨系统的理论,对信息论、控制论、运筹学、系统工程方法论等系统工程技术作了简要介绍。

本书可作为高等院校系统科学、系统工程、管理工程、计算机及相关工程技术、管理类专业的教材,亦可作为管理人员、工程技术和科学研究人员、管理干部的培训教材和自学参考书。

本书编写组

许国志 中国工程院院士,中国科学院系统科学研究所研究员
顾基发 中国科学院系统科学研究所研究员
车宏安 上海理工大学系统工程研究所教授
陈 禹 中国人民大学信息学院教授
苗东升 中国人民大学哲学系教授
姜 璐 北京师范大学系统科学系教授
谭跃进 国防科学技术大学管理学院教授

本书评审组

- 丁景元 国务院学位委员会委员,国务院学位委员会航空宇航科学与技术学科评议组成员,中国系统工程学会副理事长,中国航天科技集团公司 710 所研究员
- 方福康 国务院学位委员会委员,国务院学位委员会系统科学学科评议组召集人,中国系统工程学会系统理论委员会副主任,北京师范大学非平衡系统研究所教授
- 汪应洛 国务院学位委员会管理科学与工程学科评议组召集人,西安交通大学管理学院教授
- 范文涛 中国系统工程学会副理事长、学术工作委员会主任,中国科学院武汉物理与数学研究所研究员
- 戴汝为 中国科学院院士,国务院学位委员会控制科学与工程学科评议组召集人,中国科学院自动化研究所研究员
- 许国志 本书主编,中国工程院院士,中国科学院系统科学研究所研究员
- 顾基发 本书副主编,中国系统工程学会理事长,中国科学院系统科学研究所研究员
- 车宏安 本书副主编,中国系统工程学会教育与普及工作委员会主任,上海理工大学系统工程研究所教授

前 言

在我国开展系统科学和系统工程的研究和应用,以1978年钱学森、许国志、王寿云发表“组织管理的技术——系统工程”为标志算起,也已整整22年了。20多年来,在老一辈科学家的领导和推动下,在全国系统科学和系统工程界的努力下,在工程应用和基础理论的研究和推广方面都取得了丰硕成果和经验。在此基础上,许国志在1998年8月举办的“系统科学与工程研讨班”开幕式上提出编写一本系统科学教材。1998年8月28日中国系统工程学会常务理事会讨论决定,将编写系统科学教材列为学会的工作,由教育与普及工作委员会、系统理论委员会和学术工作委员会具体负责;具体工作分两步走:第一步于1999年底编出一本反映目前教学、研究成果的教材,面向理、工、管理类学生,力求将有关系统科学学科的常用词汇作一定程度的“规范化”,对今后形成“共识”起一定的引导作用。第二步从2000年起有计划地开展有关系统科学(主要是基础理论层次)体系和内容的研讨,条件成熟时再编写一本有系统科学学科基本概念贯穿全书的教材。钱学森听取了汇报,并回信鼓励,很同意提出的第一步工作:将系统科学常用词规范化,指出这是学会的重要工作。

1998年8月底,编写组部分同志在北京讨论了《系统科学教程》章节设置(“编写大纲初稿”)。10月初有关同志在上海讨论并修改成了《系统科学教程》“编写大纲二稿”。12月中国系统工程学会在广州召开第十届年会,有关同志又在广州讨论修改成了“编写大纲三稿”提交中国系统工程学会,学会在年会期间对“编写大纲三稿”进行了专场讨论。根据与会专家的意见,修订成“编写大纲四稿”。《系统工程理论与实践》、《系统工程学报》、《系统工程》、《系统工程:理论、方法、应用》等杂志全文登载了“编写大纲四稿”,在全国范围广泛征求意见。1999年5月初有关同志在北京召开了专门会议,根据收集到的意见对大纲进行了最后的修订,由编写组同志据此分工进行编写。6月底在北京又召开了专门会议,对全书初稿进行了认真讨论,编写组根据讨论的意见对书稿进行了较大的修改。2000年2月10日由戴汝为、汪应洛、方福康、于景元、范文涛以及本书的正副主编许国志、顾基发、车

宏安组成了评审组对书稿进行了审议。根据评审组的意见,编写组对书稿进行了最后的加工。本书虽是分工编写的,但书稿经过多次集体讨论和相互审阅修改,反映了编写组集体的努力和共同的认识。

关于本书的总框架:1. 体现钱学森关于系统科学4个层次的体系。2. 本书的基本内容放在系统科学的基础理论(系统学)这个层次,但为了体现系统科学的体系,对系统科学的技术科学和应用技术两个层次也各列了一章(第10章和第11章)。暂未列专章阐述系统论这个“桥梁”层次。3. 我们认为系统科学的基础理论(系统学)是研究各个领域中的系统(从物理的、化学的、生命的、有意识的,直至社会的系统)所具有的带有共性的一些规律,即系统的结构、功能、演化、协同、控制的一般规律。本书第2章到第9章属于基础理论的内容。这部分的框架,大体上是按“横”、“纵”两方面来阐述的。“横”,是指讨论各类系统都具有的一些性质和规律,我们将其归纳为基本概念和方法(第2章),以及系统所具有的动态规律(按连续和离散分别阐述)、随机性和自组织(第3章至第6章);“纵”,是大体按从简单到复杂,具有不同本质特征的几类系统的理论和方法(第7章至第9章)。这个框架体系是粗略的,尚未体现出“横”、“纵”内容的以及两者之间的逻辑体系,有待下一步研究。

关于本书的内容和框架,基本原则是反映20年来国内“共识”性的教学、研究成果。因此,不少重要的工作尚未反映在书内,即使就“共识”范围来说,也肯定不够全面。本书虽按教材的要求编写,但由于系统科学学科的内容和体系都还不成熟,所以本书也是研究性的著作,希望大家共同探讨。

作为教材,本书定位在系统科学专业、系统工程专业和管理科学与工程专业的硕士生层次,兼顾博士生和本科生;对博士生,我们建议还应选读本书姊妹篇《系统科学与工程研究》有关章节及其他有关资料。

作为第一本教材性质的系统科学著作,经作者们的努力终于完稿了。有了这个良好的开端,以后就可以在使用中积累经验,不断总结,我们相信很快会有更完善的教材出现。

在本书即将问世之际,我们对所有关心支持我们编写和出版的同志表示深切的谢意。

许国志、顾基发、车宏安

2000年4月

目 录

前言	1
第 1 章 绪论	1
1.1 古今系统思想概述	1
1.2 系统科学的形成和发展	4
1.2.1 科学技术背景	4
1.2.2 40 年代到 60 年代的形成和发展	5
1.2.3 70 年代到 80 年代的发展	8
1.2.4 80 年代以来的发展	9
1.2.5 系统科学在中国的发展	10
1.3 系统科学的体系结构和重要地位	12
第 2 章 基本概念与方法	17
2.1 系统、结构、层次	17
2.1.1 系统	17
2.1.2 结构与子系统	18
2.1.3 整体与涌现性	20
2.1.4 层次	22
2.1.5 系统的分类	23
2.2 环境、行为、功能	23
2.2.1 系统的环境	23
2.2.2 系统的边界	24
2.2.3 开放性与封闭性	25
2.2.4 系统的行为	25
2.2.5 系统的功能	26
2.3 状态、演化、过程	27
2.3.1 系统状态	27
2.3.2 系统的演化	29
2.3.3 系统与过程	30

2.4	系统方法论	31
2.4.1	系统方法的哲学基础	31
2.4.2	还原论与整体论相结合	32
2.4.3	定性描述与定量描述相结合	34
2.4.4	局部描述与整体描述相结合	35
2.4.5	确定性描述与不确定性描述相结合	35
2.4.6	系统分析与系统综合相结合	36
2.5	模型方法	36
2.5.1	模型与原型	36
2.5.2	数学模型	37
2.5.3	基于计算机的模型	39
第3章	连续动态系统	41
3.1	连续动态系统的数学描述	41
3.1.1	线性动态系统	41
3.1.2	非线性动态系统	44
3.2	轨道、暂态、定态	47
3.2.1	状态空间与参量空间	47
3.2.2	暂态与定态	48
3.2.3	初态与终态	50
3.3	稳定性	51
3.3.1	动态系统的稳定性问题	51
3.3.2	稳定性的数学定义	52
3.3.3	定态的稳定性	54
3.3.4	线性系统的稳定性	57
3.3.5	非线性系统的稳定性	58
3.4	吸引子与目的性	61
3.4.1	吸引子	61
3.4.2	吸引域	63
3.4.3	系统的相图	64
3.5	周期运动与回归性	66
3.5.1	非线性系统的自激振荡	66
3.5.2	极限环分析	68

3.5.3	他激振荡	69
3.5.4	回归性与非游荡集	71
3.6	分岔	72
3.6.1	结构稳定性	72
3.6.2	分岔	73
3.6.3	1 维系统的典型分岔类型	74
3.6.4	多维系统的典型分岔类型	77
3.6.5	逐级分岔序列与多样性	79
3.7	突变	80
3.7.1	渐变与突变	80
3.7.2	初等突变的基本类型	81
3.7.3	尖拐突变	81
3.7.4	参量空间的相图分布	84
3.8	连续混沌	86
3.8.1	洛伦茨方程	87
3.8.2	勒斯勒尔方程	88
3.8.3	达芬方程	89
3.8.4	混沌的特点	90
3.9	过渡过程特性	91
第 4 章	离散动态系统	95
4.1	离散映射与离散动力学	95
4.1.1	离散映射	95
4.1.2	自动器网络模型	97
4.1.3	符号动力学	101
4.2	离散混沌	103
4.2.1	周期倍化通向混沌	103
4.2.2	倒分岔、窗口	106
4.2.3	2 维埃农迭代	108
4.2.4	混沌的特征	113
4.3	几种自动器网络模型	117
4.3.1	元胞自动机	117
4.3.2	布尔网络	122

4.3.3	神经网络	125
4.3.4	L-系统	128
4.4	遗传算法	131
4.4.1	遗传算法的基本概念	131
4.4.2	遗传算法的实现	133
4.4.3	模式定理和积木假说	137
4.4.4	遗传算法的实例	140
第 5 章	系统的随机性	145
5.1	随机过程与随机涨落	145
5.1.1	随机过程	145
5.1.2	随机涨落	148
5.2	主方程和福克尔-普朗克方程	152
5.2.1	随机行走模型及其主方程	152
5.2.2	福克尔-普朗克方程	155
5.2.3	福克尔-普朗克方程的定态解	157
5.2.4	主方程与福克尔-普朗克方程的研究思路	159
5.3	随机网络模型	160
5.3.1	整体建模框架	160
5.3.2	开关网络模型	162
5.3.3	开关网络模型的应用	169
第 6 章	系统的自组织	173
6.1	自组织与他组织	173
6.1.1	组织	173
6.1.2	他组织	174
6.1.3	自组织	176
6.2	两种有序原理	180
6.2.1	序的一般概念	180
6.2.2	对称性与有序	182
6.2.3	两种有序	185
6.2.4	有序与系统演化	188
6.3	自组织理论	189
6.3.1	耗散结构形成的条件	189

6.3.2	自组织的状态描述	192
6.3.3	役使原理	194
6.4	自组织的几种形式	196
6.4.1	生物学简单回顾	197
6.4.2	自创生	198
6.4.3	自复制	199
6.4.4	自生长	200
6.4.5	自适应	201
第 7 章	简单巨系统	203
7.1	简单系统与简单巨系统	203
7.1.1	简单系统	203
7.1.2	简单巨系统	206
7.2	熵——简单巨系统的基本概念	208
7.2.1	玻尔兹曼熵	208
7.2.2	概率测度熵	210
7.2.3	简单巨系统熵定义	211
7.2.4	简单巨系统熵对系统的描述	213
7.3	数学模型	213
7.3.1	唯象方法:宏观唯象演化模型	214
7.3.2	微观方法:分析微观作用建立模型	218
7.3.3	统计物理方法:统计静态模型	220
7.3.4	随机层次方法:随机层次演化模型	222
7.4	系统演化的分析方法	224
7.4.1	微扰论——渐变分析方法	225
7.4.2	平均值分析——变量相关性讨论	228
7.4.3	算子结构分析	232
7.5	简单巨系统理论的应用	234
7.5.1	建立模型	236
7.5.2	分析计算、结果讨论	243
7.5.3	启发	246
第 8 章	复杂适应系统理论及其应用	249
8.1	CAS 理论的基本观点和概念	249

8.1.1	圣菲研究所和 CAS 理论的产生	249
8.1.2	CAS 理论的核心思想——适应性造就 复杂性	252
8.1.3	CAS 理论的基本概念	253
8.1.4	CAS 理论的主要特点	257
8.2	个体怎样适应和学习	260
8.2.1	刺激-反应模型	260
8.2.2	适应度的确认和修改	263
8.2.3	新规则的产生	264
8.3	从个体到全局——回声模型	266
8.3.1	位置和资源	266
8.3.2	回声模型的基本框架	267
8.3.3	回声模型的扩充	268
8.4	CAS 理论的实现——SWARM 的功能和应用	270
8.4.1	SWARM 的建模方法	270
8.4.2	基于 SWARM 的模型实例	271
8.5	CAS 理论的应用	292
8.5.1	CAS 理论的主要应用领域	292
8.5.2	CAS 理论的进一步发展	293
第 9 章	开放的复杂巨系统	297
9.1	关于复杂性	297
9.2	把复杂性当作复杂性处理	299
9.3	开放的复杂巨系统	302
9.3.1	巨系统	302
9.3.2	复杂巨系统	303
9.3.3	开放的复杂巨系统	304
9.3.4	几类典型开放的复杂巨系统	305
9.3.5	社会——开放的特殊复杂巨系统	307
9.4	从定性到定量综合集成方法	310
9.4.1	综合集成方法的提出	311
9.4.2	综合集成方法的特点	313
9.5	综合集成研讨厅体系	316

9.5.1	综合集成研讨厅体系结构	316
9.5.2	总体设计部	318
第 10 章	技术科学层次的系统科学	321
10.1	引言	321
10.2	控制论	322
10.2.1	控制问题	322
10.2.2	控制任务	324
10.2.3	控制方式	325
10.2.4	控制系统	328
10.2.5	建模与辨识	331
10.2.6	控制论面临的挑战	333
10.3	运筹学	334
10.3.1	从物理到事理	334
10.3.2	运筹问题	335
10.3.3	运筹模型	337
10.3.4	运筹数学	338
10.3.5	运筹学的软化	339
10.4	信息论	340
10.4.1	信息与系统	340
10.4.2	什么是信息	342
10.4.3	信息的度量	343
10.4.4	通信理论	345
10.4.5	信息论的拓广	350
第 11 章	系统科学的工程技术	353
11.1	系统工程的发展和应用	353
11.1.1	实践需要系统工程技术	353
11.1.2	系统工程的发展和应用	355
11.2	系统工程方法论	357
11.2.1	霍尔和切克兰德的系统工程方法论	358
11.2.2	并行工程方法学	361
11.3	系统建模、仿真与分析	364
11.3.1	系统建模方法	364

11.3.2	系统仿真方法	366
11.3.3	系统分析方法	369
11.4	系统评价与决策	371
11.4.1	系统评价与决策的复杂性	371
11.4.2	决策过程与决策问题	373
11.5	应用实例	375
11.5.1	宏观经济智能决策支持系统的研究和 开发	375
11.5.2	洞庭湖治理问题的研究	378
结语		385
注释与参考文献		389
后记		399
索引		401

Table of Contents

Prologue	1
1. Introduction	1
1.1 Sketch of Ancient and Modern System Thoughts	1
1.2 Formation and Development of Systems Science	4
1.2.1 Scientific and Technological Background	4
1.2.2 Formation and Development from 1940's to 1960's	5
1.2.3 Development from 1970's to 1980's	8
1.2.4 Development since 1980's	9
1.2.5 Development of System Science in China	10
1.3 System Structure and Important Position of Systems Science	12
2. Basic Concepts and Methods	17
2.1 System, Structure, and Hierarchy	17
2.1.1 System	17
2.1.2 Structure and Sub-system	18
2.1.3 Wholeness and Emergence	20
2.1.4 Hierarchy	22
2.1.5 Classification of Systems	23
2.2 Environment, Action, and Function	23
2.2.1 Environment of System	23
2.2.2 Boundary of System	24
2.2.3 Opening and Closure	25
2.2.4 Action of System	25
2.2.5 Function of System	26
2.3 State, Evolution, and Process	27
2.3.1 State of System	27
2.3.2 Evolution of System	29
2.3.3 System and Process	30

2.4	System Methodology	31
2.4.1	Philosophical Basic of System Method	31
2.4.2	Combination of Reductionism and Wholeness	32
2.4.3	Combination of Qualitative and Quantitative Descriptions ...	34
2.4.4	Combination of Local and Global Descriptions	35
2.4.5	Combination of Determined and Undetermined Descriptions	35
2.4.6	Combination of System Analysis and System Synthesis	36
2.5	Modeling Method	36
2.5.1	Model and Prototype	36
2.5.2	Mathematical Model	37
2.5.3	Computer-Based Models	39
3.	Continuous Dynamic System	41
3.1	Mathematical Descriptions of Continuous Dynamic System	41
3.1.1	Linear Dynamic System	41
3.1.2	Nonlinear Dynamic System	44
3.2	Trajectory, Transient State, and Steady State	47
3.2.1	State Space and Parameter Space	47
3.2.2	Transient State and Steady State	48
3.2.3	Initial State and Final State	50
3.3	Stability	51
3.3.1	Stability Problem of Dynamic System	51
3.3.2	Mathematical Definition of Stability	52
3.3.3	Stability of Steady State	54
3.3.4	Stability of Linear System	57
3.3.5	Stability of Nonlinear System	58
3.4	Attractor and Teleonomy	61
3.4.1	Attractor	61
3.4.2	Domain of Attraction	63
3.4.3	Phase Portrait of System	64
3.5	Periodic motion and Recurrence	66
3.5.1	Self-excited Oscillation in Nonlinear System	66

3.5.2	Analysis of Limit Cycle	68
3.5.3	Forced Oscillation	69
3.5.4	Recurrence and Nonwandering Set	71
3.6	Bifurcation	72
3.6.1	Structural Stability	72
3.6.2	Bifurcation	73
3.6.3	Types of Bifurcation in Single-dimension System	74
3.6.4	Types of Bifurcation in Multi-dimension System	77
3.6.5	Bifurcation Cascade and Diversity	79
3.7	Catastrophe	80
3.7.1	Gradual Change and Sudden Change (Catastrophe)	80
3.7.2	Basic Types of Elementary Catastrophes	81
3.7.3	Cusp Catastrophe	81
3.7.4	Phase Portrait Distribution in Parameter Space	84
3.8	Continual Chaos	86
3.8.1	Lorenz Equation	87
3.8.2	Rössler Equation	88
3.8.3	Duffing Equation	89
3.8.4	Characters of Chaos	90
3.9	Characters of Transient Process	91
4.	Discrete Dynamic System	95
4.1	Discrete Mapping and Discrete Dynamics	95
4.1.1	Discrete Map	95
4.1.2	Automaton Network Models	97
4.1.3	Symbolic Dynamics	101
4.2	Discrete Chaos	103
4.2.1	Period-doubling Route to Chaos	103
4.2.2	Inverse Bifurcation, and Window	106
4.2.3	Two-dimension Hénon Iteration	108
4.2.4	Characters of Chaos	113
4.3	Several Automaton Network Models	117
4.3.1	Cellular Automaton	117

4.3.2	Boolean Network	122
4.3.3	Neural Network	125
4.3.4	L-System	128
4.4	Genetic Algorithm (GA)	131
4.4.1	Basic Concepts of GA	131
4.4.2	Realization of GA	133
4.4.3	Schemata Theorem and Building Block Hypothesis	137
4.4.4	Examples of GA	140
5.	Stochasticity of Systems	145
5.1	Stochastic Process and Stochastic Fluctuation	145
5.1.1	Stochastic Process	145
5.1.2	Stochastic Fluctuation	148
5.2	Master Equation and Fokker-Planck Equation	152
5.2.1	Random Walk Model and Its Master Equation	152
5.2.2	Fokker-Planck Equation	155
5.2.3	Steady State Solution of Fokker-Planck Equation	157
5.2.4	Researching Lines of Master Equation and Fokker-Planck Equation	159
5.3	Stochastic Network Model	160
5.3.1	Framework of Ensemble Modeling	160
5.3.2	Switch Network Model	162
5.3.3	Application of Switch Network Model	169
6.	Self-organization in System	173
6.1	Self-organization and Hetero-organization	173
6.1.1	Organization	173
6.1.2	Hetero-organization	174
6.1.3	Self-organization	176
6.2	Ordering Principles	180
6.2.1	General Concepts of Order	180
6.2.2	Symmetry and Order	182
6.2.3	Two Kinds of Order	185
6.2.4	Ordering and System Evolution	188

6.3	Self-organization Theory	189
6.3.1	Formation of Dissipative Structure	189
6.3.2	State Description in Self-organization	192
6.3.3	Slaving Principle	194
6.4	Forms of Self-organization	196
6.4.1	Biology Background	197
6.4.2	Self-creation	198
6.4.3	Self-duplication	199
6.4.4	Self-growth	200
6.4.5	Self-adaptation	201
7.	Simple Giant System (SGS)	203
7.1	Simple System and SGS	203
7.1.1	Simple System	203
7.1.2	Simple Giant System	206
7.2	Entropy – A Basic Concept of SGS	208
7.2.1	Boltzmann Entropy	208
7.2.2	Probability Entropy	210
7.2.3	Definition of Entropy in SGS	211
7.2.4	Description of System by Entropy in SGS	213
7.3	Mathematical Model	213
7.3.1	Phenomenological Method; Macroscopic Evolution Model	214
7.3.2	Microscopic Method; Modeling by Analysis Microscopic Action	218
7.3.3	Statistical Physics Method; Statistical Static Model	220
7.3.4	Stochastic Method; Stochastic Evolution Model	222
7.4	Analysis of System Evolution	224
7.4.1	Perturbation Theory – Gradual Changing Analysis Method	225
7.4.2	Average Analysis – Discussion of Variables Correlation	228
7.4.3	Analysis of Operator Structure	232
7.5	Application of the Theory of SGS	234

7.5.1	Modeling	236
7.5.2	Analysis Calculation, and Discussing Results	243
7.5.3	A Hint	246
8.	Theory of Complex Adaptive System (CAS) and Its Applications	249
8.1	Basic in CAS	249
8.1.1	Santa Fe Institute and the Birth of CAS Theory	249
8.1.2	A Central Thought of CAS Theory: Adaptation Make Complexity	252
8.1.3	Basic Concepts of CAS Theory	253
8.1.4	Main Characters of CAS Theory	257
8.2	How do Agent Adapt and Learning?	260
8.2.1	Excitement-response Model	260
8.2.2	Identifying and Modifying Fitness	263
8.2.3	Production of New Rules	264
8.3	From Agent to Overall Situation: Echo Model	266
8.3.1	Site and Resource	266
8.3.2	Basic Frame of Echo Model	267
8.3.3	Expansion of Echo Model	268
8.4	Realization of CAS Theory: Function and Application of SWARM	270
8.4.1	Modeling Method of SWARM	270
8.4.2	Examples of SWARM-Models based	271
8.5	Application of CAS Theory	292
8.5.1	Main Application Field of CAS Theory	292
8.5.2	Further Development of CAS Theory	293
9.	Open Complex Giant System (OCGS)	297
9.1	On Complexity	297
9.2	Treating Complexity as Complexity	299
9.3	Open Complex Giant System (OCGS)	302
9.3.1	Giant System	302
9.3.2	Complex Giant System	303

9.3.3	Open Complex Giant System	304
9.3.4	Several Kinds of Typical OCGS	305
9.3.5	Society: A Special OCGS	307
9.4	Meta-synthesis Method from Qualitative to Quantitative	310
9.4.1	The Presentation of Meta-synthesis Method	311
9.4.2	Characters of Meta-synthesis Method	313
9.5	Meta-synthesis Research Hall System	316
9.5.1	Structure of Meta-synthesis Research Hall System	316
9.5.2	Department of Integrative System Design	318
10.	Systems Science on Technological Science Level	321
10.1	Introduction	321
10.2	Control Theory	322
10.2.1	Question of Control Theory	322
10.2.2	Task of Control Theory	324
10.2.3	Method of Control Theory	325
10.2.4	System of Control Theory	328
10.2.5	Modeling and Recognition	331
10.2.6	Challenge to Control Theory	333
10.3	Operational Research (OR)	334
10.3.1	From Physic to Logic	334
10.3.2	Question of OR	335
10.3.3	Model of OR	337
10.3.4	Mathematics of OR	338
10.3.5	Softening of OR	339
10.4	Information Theory	340
10.4.1	Information and System	340
10.4.2	What is Information?	342
10.4.3	Measure of Information	343
10.4.4	Communication Theory	345
10.4.5	Expansion of Information Theory	350
11.	Engineering Technology of Systems Science	353
11.1	Development and Application of System Engineering	353

11.1.1	Practice Needs System Engineering	353
11.1.2	Development and Application of System Engineering	355
11.2	Methodology in System Engineering	357
11.2.1	Methodology in System Engineering Presented by Hall and Checkland	358
11.2.2	Concurrent Engineering Methodology	361
11.3	Modeling, Simulation and Analysis for System	364
11.3.1	Modeling Method of System	364
11.3.2	Simulation Method of System	366
11.3.3	Analysis Method of System	369
11.4	Valuation and Decision-making for System	371
11.4.1	Complexity of Valuation and Decision-making for System	371
11.4.2	Process of Decision-making and Problem of Decision- making	373
11.5	Application Examples	375
11.5.1	Research and Development of System with Macro- economic Intelligence Decision - making	375
11.5.2	Research of Governing Dong Ting Lake	378
	Concluding Remarks	385
	Notes and References	389
	Epilogue	399
	Index	401

第 1 章 绪论

系统观念,源远流长,但作为科学的系统思想则形成于 20 世纪中叶。系统科学(systems science)作为一个大门类的新兴学科,经历了孕育、形成和发展的漫长过程。

1.1 古今系统思想概述¹

系统思想(system thought)就其最基本的涵义来说,是关于事物的整体性观念、相互联系的观念、演化发展的观念。

系统概念来源于古代人类社会实践经验。人类自有生产活动以来,无不在同自然系统打交道。管子《地员篇》、《诗经》农事诗《七月》、西汉氾胜之著《氾胜之书》等古籍,对农作与种子、地形、土壤、水分、肥料、季节、气候诸因素的关系,都有辩证的叙述。齐国名医扁鹊主张按病人气色、声音、形貌综合辨症,用砭法、针灸、汤液、按摩、熨贴多种疗法治病;周秦至西汉初年古代医学总集的《黄帝内经》,强调人体各器官的有机联系、生理现象和心理现象的联系、身体健康与自然环境的联系。战国时期秦国李冰设计修造了伟大的都江堰,包括“鱼嘴”岷江分水工程、“飞沙堰”分洪排沙工程、“宝瓶口”引水工程三大主体工程 and 120 个附属渠堰工程,工程之间的联系处理得恰到好处,形成一个协调运转的工程总体。我国古天文学很早就提示了天体运行与季节变化的联系,编制出历法和指导农事活动的廿四节气。所有这些古代农事、工程、医药、天文知识和成就,都在不同程度上反映了朴素的系统概念的自发应用。

朴素的系统概念,不仅表现在古代人类的实践中,而且在古代中国和古希腊的哲学思想中得到了反映。古代中国和古希腊的唯物主义思想家都从承认统一的物质本原出发,把自然界当作一个统一体。古希腊辩证法奠基人之一的赫拉克利特(Heracleitus),在《论自然界》一书中说:“世界是包括一切的整体。”古希腊唯物主义者德谟克利特(Democritus)的一本没有留传下来的著作名为《宇宙大系统》。公元前 6 世纪至 5 世纪之间,我国春秋末期思想家老子强调自然界的统一性;南宋陈亮的理一分殊思想,称理一为天地

万物的理的整体,分殊是这个整体中每一事物的功能,试图从整体角度说明部分与整体的关系。用自发的系统概念考察自然现象,这是古代中国和古希腊唯物主义哲学思想的一个特征。古代辩证唯物的哲学思想包含了系统思想的萌芽。

古代朴素唯物主义哲学思想虽然强调对自然界整体性、统一性的认识,却缺乏对这一整体各个细节的认识能力,因而对整体性和统一性的认识是不完全、不深刻的。

15 世纪下半叶,近代科学开始兴起,力学、天文学、物理学、化学、生物学等科目逐渐从混为一体的自然哲学中分离出来,获得日益迅速的发展。近代自然科学发展了研究自然界的独特的分析方法,包括实验、解剖和观察,把自然界的细节从总的自然联系中抽出来,分门别类地加以研究。这种考察自然界的方法移植到哲学中,就成为形而上学的思维方式。形而上学的出现是有历史根据的,是时代的需要,因为在深入的、细节的考察方面它比古代哲学是一个进步,在 300 多年的历史时期中,对科学、技术、文化的蓬勃发展起了不可磨灭的重要作用。但是,形而上学撇开总体的联系来考察事物和过程,蕴含着极大的局限性,随着人们对客观事物认识的不断扩展和深化,这种局限性就日益显露出来,并障碍堵塞了人们从了解部分到了解整体,从分析具体细节到洞察普遍联系的道路。

19 世纪上半叶,自然科学取得了一系列伟大成就。特别是能量转化、细胞和进化论的发现,使人类对自然过程的相互联系的认识有了很大提高。恩格斯(F. Engels)指出:

由于这三大发现和自然科学的其他巨大进步,我们现在不仅能够指出自然界中各个领域内的过程之间的联系,而且总的说来也能指出各个领域之间的联系了,这样,我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实,以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画。描绘这样一幅总的图画,在以前是所谓自然哲学的任务。而自然哲学只能这样来描绘:用观念的、幻想的联系来代替尚未知道的现实的联系,用想象来补充缺少的事实,用纯粹的臆想来填补现实的空白,它在这样做的时候提出了一些天才的思想,预测到一些后来的发现,但是也发表了十分荒唐的见解,这在当时是不可能不这样的。今天,当人们对自然研究的结果只要辩证地即从它们自身的联系进行考察,就可以制成一个在我们这个时代是令人满意的“自然体系”的时候,当这种联系的辩证性质,甚至违背自然研究者的意志使他们受过形而上学训练的头脑

不得不承认的时候,自然哲学就最终被排除了。²

19 世纪的自然科学“本质上是整理材料的科学,是关于过程、关于这些事物的发生和发展以及关于联系——把这些自然过程结合为一个大的整体——的科学”³,这样的自然科学,为唯物主义自然观建立了更加坚实的基础,为马克思主义哲学提供了丰富的材料。马克思(K. Max)、恩格斯的辩证唯物主义认为,物质世界是由无数相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的事物和过程所形成的统一整体。辩证唯物主义体现的物质世界普遍联系及其整体性的思想,也就是系统思想。

由此可以看出,在近代科学技术和文化发展的基础上,到了 19 世纪,系统思想进一步从经验上升为哲学,从思辨进展到定性论述。

科学的定量的系统思想,是在现代科学、技术、文化发展的基础上形成的。现代科学技术对于系统思想方法来说,第一个贡献在于使系统思想定量化,成为一套具有数学理论、能够定量处理系统各组成部分相互联系的科学方法;第二个贡献在于为定量化系统思想的实际应用提供了强有力的计算工具——电子计算机。这两大贡献都是在 20 世纪中期实现的。

科学的定量的系统思想的形成,又根本上来源于社会实践的需要。社会实践活动的大型化和复杂化,要求系统思想方法不仅能定性,而且能定量。解决现代社会种种复杂的系统问题,对材料的定量要求越来越强烈,这尤其表现在军事活动中,因为战争中决策的成败关系到国家民族的生死存亡。第二次世界大战是定量化系统方法发展的催生婆。这次战争在方法和手段上的复杂程度较以往的战争有很大增长,交战双方都需要在强调全局观念、从全局出发合理使用局部、最终求得全局效果最佳的目标下,对所拟采取的措施和反措施进行精确的定量分析,才有希望在对策中取胜。这样一种强烈的需要,以极大的力量把一大批有才干的科学工作者吸引到拟定与评价战争计划、改进作战技术与军事装备使用方法的研究工作中,其结果就是定量化系统方法及强有力的计算工具电子计算机的出现,并成功地应用于作战分析。战后,定量化系统方法开始广泛地用来分析工程、经济、社会领域的大型复杂系统问题。一旦取得了数学表达形式和计算工具,系统思想方法就从一种哲学思维发展成为专门的科学。

概括地说,系统思想是进行分析与综合的辩证思维工具,它在辩证唯物主义那里取得了哲学的表达形式,在运筹学等学科那里取得了定量的表述形式,在系统工程那里获得了丰富的实践内容。古代农事、工程、医药、天文

方面的实践成就,以及建立在这些成就之上的古代中国和古希腊朴素的唯物主义自然观(以抽象的思辨原则来代替自然现象的客观联系);近代自然科学的兴起,以及由此产生的形而上学自然观(把自然界看作彼此不相依赖的各个事物或各个现象的偶然堆积);19世纪自然科学的伟大成就,以及建立在这些成就基础之上的辩证唯物主义自然观(以实验材料来说明自然界是有内部联系的统一整体,其中各个事物、现象是有机地相互联系、相互依赖、相互制约着的);20世纪中期现代科学技术的成就,为系统思想提供了定量方法和计算工具;这就是系统思想如何从经验到哲学到科学、从思辨到定性到定量的大致发展情况。

1.2 系统科学的形成和发展

1.2.1 科学技术背景

一门新学科的形成和发展总是和总的科学技术背景有关的。系统科学作为现代科学技术体系中的一个大部门,作为一门综合的、横断的新兴科学技术部门,更是如此。

人类对客观世界的认识和改造,从总体到局部,再到总体;从分析到综合,再分析,再综合,不断地螺旋式地向更广、更深发展。提出量子论的普朗克(M. Planck)认为,“科学是内在的整体,它被分解为单独的部门不是取决于事物的本质,而是取决于人类认识能力的局限性。实际上存在着由物理到化学、通过生物学和人类学到社会科学的连续的链条,这是一个任何一处都不能被打断的链条”^[4]。这样一幅世界的整体图象是不断发展的。

就近代来说,经过300年的近代科学技术的发展,到了20世纪初,以量子论和相对论的创立为标志,开始了人类史上最伟大的科学革命。微观层次建立了统一的量子力学和原子结构理论,宇观层次建立了科学的宇宙结构的学说。尤其是综合了粒子物理成就的宇宙演化模型的建立,是人类认识史上一个最具革命性的、划时代的伟大事件;对系统科学的形成和发展来说更有特殊的重大意义,因为实证的宇宙演化模型的建立,从根本上为科学的系统演化理论的形成和发展打下了坚实的基础。在这些伟大成就的背景下,人们很自然要把重点集中于以人为尺度的宏观层次,寻求这个层次事物的产生、发展和演化的共性规律。这个层次的生命系统和人类社会更是世界上最复杂的事物,是宇宙演化绽开出的最美的花朵。反映这种趋向的一个有代表性的事例,就是在1943年,量子力学创始人之一的薛定谔(E.

Schrödinger)在爱尔兰的都柏林三一学院作了一次题为“生命是什么——活细胞的物理学观”的讲演(于1944年整理出版)。正是由于在科学技术的这个总形势下广大科学技术工作者的努力,在40年代中期以来的半个多世纪里,以人类社会系统和生命系统为代表的“宏观层次”的科学技术获得了蓬勃的发展,使人类社会的面貌发生了巨大的变化。

20世纪,由于生产力的巨大发展,出现了许多大型、复杂的工程技术和社会经济的问题,它们都以系统的面貌出现,都要求从整体上加以优化解决。由于这种社会需要的巨大推动,第二次世界大战后,雨后春笋般出现一个“学科群”,簇拥着科学形态的系统思想涌现出地平线,横跨自然科学、社会科学和工程技术,从系统的结构和功能(包括协调、控制、演化)角度研究客观世界的系统科学便应运而生了。

1.2.2 40年代到60年代的形成和发展

科学家明确地直接把系统作为研究对象,一般公认以贝塔朗菲(von Bertalanffy, 1910~1971)提出“一般系统论”(general system theory)概念为标志。40年代出现的系统论、运筹学、控制论、信息论是早期的系统科学理论,而同时期出现的系统工程、系统分析、管理科学则是系统科学的工程应用。

1.2.2.1 一般系统论⁵

贝塔朗菲是理论生物学家,1937年在芝加哥大学莫利斯(C. Morris)主持的哲学讨论会上第一次提出了一般系统论的概念。1945年贝塔朗菲的《关于一般系统论》于《德国哲学周刊》第18期上发表,明确提出一般系统论的任务“乃是确立适用于系统的一般原则”,并对系统的共性作了一定的概括,如系统的整体性、关联性、动态性、有序性、终极性(目的性)等。贝塔朗菲提出一般系统论是从有关生物和人的问题出发的。他认为对这类问题不能沿用讨论无机界问题常用的机械论的分析方法。他认为现实是一个有组织的由实体构成的递阶秩序,在许多层次的叠加中从物理、化学系统引向生物、社会系统;因此,不能把分割的部分的行为拼加成整体,必须考虑各个子系统和整个系统之间的关系才能了解各部分的行为和整体。他认为分析和人为隔离的方法是有用的,但要看到,即使对物理学的实验和理论也都还不是充分的。他的这些见解,今天看来是深刻的、前瞻性的。经过40年代末到50年代初的发展,一般系统论开始形成了国际性新学科。1954年成立“一般系统论学会”(1956年改名为“一般系统研究会”,80年代末又改名为“国际系统科学学会”),出版了机关刊物《行为科学》,《一般系统年鉴》。一

般系统论对系统科学的形成和发展作出了重要贡献,但它们关于建立各种系统共同规律的探索,还是定性描述和概念的阐发居多,深入的定量理论和方法较少。

1.2.2.2 运筹学⁶

30年代末,由于战争的需要,研制了雷达系统。这个新的系统的有效运行,以及其他武器系统的分析和评价,提出许多问题并逐一得到较满意的解决,从而出现了运筹学(operational research)。一个武器系统的分析、评价和有效运行,不外乎分析制约因素(约束条件)以及要实现的目标(使其达到极大或极小)。推而广之,完成一项任务,做好一件事情,也是如此。运筹学的贡献,是把这个共性概括成了一种数学模式:联立约束条件方程和目标函数方程并求解。在这个模式的框架下,进一步建立了若干类型的具体数学模型。由于大批著名科学家的参与,运筹学得到迅速发展。第二次世界大战后,英国军方的一份《总结报告》曾说:“这种由资深科学家进行的,改善海军的技术和物质运作的科学方法,被称为运筹学”,“和以往的历次战争相比,这次战争更是新的技术策略和反策略的较量……我们在几次关键战役中加快了反应速度,运筹学使我们赢得了胜利。”

第二次世界大战以后,运筹学从单纯军事和战争中的应用研究,转移到经济和工业管理中的应用,并形成了自己的理论和方法。到60年代末运筹学达到了成熟的高峰期,其标志是1969年出版的瓦格纳(H. M. Wagner)的《运筹学原理和对管理决策的应用》。这是一本树立了运筹学新标准的教科书,获得广泛应用。

1.2.2.3 控制论⁷

控制论(cybernetics)的创始人是美国的维纳(N. Wiener, 1894 ~ 1964),他把控制论定义为:关于在动物和机器中控制和通信的科学。控制论是在20世纪30~40年代蓬勃发展的自动控制技术和统计数学的背景下诞生的。从系统科学发展来说,控制论的诞生和发展有特别重大的意义,因为控制论提炼出了包括生物系统和人工系统极为广泛的一大类系统的共性和规律,这一大类的系统实质上也是系统科学研究的主要对象。控制论提炼出的基本概念,诸如目的、行为、通信、信息、输入、输出、反馈、控制以及在这些概念基础上的控制论系统模型,即输入—输出反馈控制模型,具有广泛的普适意义,并且紧密联系着基础理论和应用技术两头。因此,从一定意义上说,半个世纪以来,系统科学的发展在总体上是和控制论的发

展紧密相关的。

1.2.2.4 信息学^{8,9}

我们这里所说的信息学(informatics, information science),是关于系统的信息传递和处理的科学理论,不仅是香农(C. E. Shannon)的信息论(information theory),还包括电子计算机理论。香农信息论和电子计算机的诞生和发展,是对系统的信息传递和处理过程规律的研究取得根本性突破的里程碑。

香农信息论形成的技术背景是通信工程。第二次世界大战对通信的实际需要,迫切要求建立通信理论。香农在1948年发表了《通信的数学理论》,宣告了信息论的诞生。香农的信息论提炼出了包括信源、信宿、信道的信号传输的普适模型,定义了信息量,提出了信源编码定理等重要定理,为一般意义上的信息传输奠定了理论基础。

1948年电子计算机的诞生,是人类认识世界、改造世界的一个伟大事件。电子计算机不单是威力巨大的计算手段,它首先标志着人类对信息处理本质的深刻认识。信息处理原本是人的智能,电子计算机的诞生就宣告了对人类智能的机理有了基本的本质性的认识,并且实现了人的处理信息的智能可以部分由人造物代替。电子计算机现在被广泛叫做“电脑”,不但形象,也是很确切的。

对于系统科学研究的一大类系统,控制论从系统外显的目的行为出发,把目的行为和信息的获取、传输和处理关联起来,概括成了一个反馈控制模型。而香农信息论则撇开了所谓信息的语义,从信息的语法方面建立了传递信息的通信系统模型。冯·诺伊曼(von Neumann)计算机则实现了一种处理信息的“物理符号系统”,这是人类智能物化的伟大起点。目的、行为、控制、信息、语法、语义、智能等本来都是表征人的活动的词汇,由于控制论、信息学的发展,这些词汇也被赋予了机器等人工物。

这样,运筹学、控制论和信息学的成就,就把科学的定量的系统思想的适用范围,从自然物扩展到人工物,从“物理”扩展到“事理”;为系统科学横断自然科学、社会科学和工程技术的基本特征的形成奠定了基础。

1.2.2.5 系统工程、系统分析、管理科学¹⁰

20世纪30~40年代工程技术有了巨大进步,加上第二次世界大战的因素,更有了飞速的发展。随着生产规模越来越大,生产技术越来越复杂,科学研究涉及的专业和部门越来越多。这些大规模的生产系统、技术系统和科学系统由许多部分组成,关系错综复杂,需要人们从整体和相互联系的角度

度去考虑问题,需要制定一套处理复杂系统和组织工作的科学方法及程序。40年代,美国贝尔电话公司首先使用了“系统工程(systems engineering)”命名设计新系统的科学方法。1957年,美国密执安大学的古德(A. H. Goode)和麦考尔(R. E. Machal)合作出版了第一本以“系统工程”命名的书。第二次世界大战后,美国的兰德公司,针对大型社会、经济系统问题的研究,倡导“系统分析(system analysis)”,着重于在解决大型社会经济系统中的问题时,对若干可供选择的执行特定任务的系统方案进行选择比较,进行费用效果分析。此外,针对大企业的经营管理技术的发展,以泰勒(F. W. Taylor, 1856~1915)为代表的科学管理发展成了管理科学(management science)。

1969年,阿波罗飞船登月成功,被公认为是系统工程成功的范例,引起了人们对系统工程的广泛重视。1972年成立了国际应用系统分析研究所。直至目前,国际上定量化系统思想和方法的实际应用基本上仍沿着这三大学科蓬勃发展。

第二次世界大战以后,一般系统论、运筹学、控制论、信息学,以及系统工程、系统分析和科学管理,相互渗透融合,织出了一幅系统科学从自然界扩展到人类社会,从基础理论到工程应用的五彩缤纷的图景,写出了系统科学40~60年代诞生、成长的历程。

1.2.3 70年代到80年代的发展^{11,12}

这一时期的发展主要是系统自组织理论的建立。

比利时物理化学家普利高津(I. Prigogine, 1917~)于1969年提出耗散结构理论(dissipative structure theory)。他认为热力学第二定律以及统计力学所揭示的是孤立系统(和环境没有物质和能量的交换)在平衡态和近平衡态条件下的规律,但在开放并且远离平衡的情况下,系统通过和环境进行物质和能量交换,一旦某个参量变化达到一定的阈值,系统就有可能从原来的无序状态自发转变到在时间、空间和功能上的有序状态。普利高津把这种在远离平衡情况下所形成的新有序结构称为“耗散结构”(dissipative structure)。

德国物理学家哈肯(H. Haken, 1927~)于1969年提出了协同学(synergetics)。哈肯发现激光是一种典型的远离平衡态时由无序转化为有序的现象,但他发现即使在平衡态时也有类似现象,如超导和铁磁现象。这就表明,一个系统从无序转变为有序的关键并不在于系统是平衡或非平衡,也不在于离平衡态有多远,而是通过系统内部各子系统之间的非线性相互作用,

在一定条件下,能自发产生在时间、空间和功能上稳定的有序结构,这就是自组织(self-organization)。哈肯还指出,系统在临界点附近的行为仅由少数慢变量决定,系统的快变量由慢变量(序参量)支配,就是所谓的役使原理。

耗散结构理论和协同学从宏观、微观以及两者的联系上回答了系统自己走向有序结构的基本问题,两者都被称为自组织理论。

耗散结构理论和协同学都源出于具体学科,耗散结构理论是物理化学学科的研究成果,协同学是研究激光的成果,但普利高津和哈肯都敏锐地认识到它们的普适意义,经他们本人及其学派,再加上整个系统科学界的努力,早先的自组织理论,已发展为“系统自组织理论”了。

70年代还有一些理论对系统科学的发展有重要的意义。艾根(M. Eigen)吸收了进化论思想和自组织理论,于1979年发表了“超循环理论”(hypercycle theory)¹³,把生命起源解释为自组织现象,提出了一个自然界演化的自组织原理——超循环。托姆(R. Thom)于1972年发表了《结构稳定性与形态发生学》¹⁴,对突变现象及其理论作出了系统深刻的阐述。

1.2.4 80年代以来的发展

80年代以来,非线性科学(nonlinear science)和复杂性研究(complexity study)的兴起对系统科学的发展起了很大的积极推动作用。

国际学术界在80年代形成了研究非线性科学的热潮,因为人们意识到非线性科学取得的成就昭示了对世界本质的认识又跃进了一大步。客观世界的一切事物,从根本上说都是相互作用体和相互作用过程;非线性是数学概念,是相互作用的数学表达。一个系统不仅是其部分的总和,这意味着叠加原理失效,在数学上说就是非线性。非线性科学研究各门科学中有关非线性的共性问题。一切事物作为系统,无论是系统内部结构和外显的系统功能,以及系统演化过程都是相互作用的显示,因而也都是非线性的。特殊地说,系统科学(尤其是基础理论层次)特别关心一个系统的性能怎样随着时间变化,有没有稳定的终态(相应于贝塔朗非的用语 finality);这在非线性动力学中就是有没有稳定的定常状态(stable steady state, 稳定定态, 稳态)和分岔(bifurcation)问题。任何系统都是一种稳态,非线性动力学中讨论的稳态大体有平衡(不动点)、振荡(极限环)和混沌,(拟周期解可认为是振荡的组合),比过去只讨论平衡有了根本性的拓展,这就为研究系统的复杂形态提供了科学依据和方法。因此,非线性科学的成果极大地丰富和深化了系统科学和系统工程定量化的发展。^{15~17}可以说,

耗散结构理论和协同学正是在 80 年代吸收了非线性科学的成果,在理论上提高到一个新的高度^{18,19};也可以说,非线性科学的进展推动了 80 年代后期复杂性研究的兴起。²⁰

80 年代中期,国际科学界兴起了对复杂性的研究,一个突出的标志是 1984 年在美国新墨西哥州成立了以研究复杂性为宗旨的圣菲研究所(Santa Fe Institute,简称 SFI)。这是由 3 位诺贝尔奖获得者盖尔曼(M. Gell-Mann)、阿罗(K. J. Arrow)、安德森(P. W. Anderson)为首的一批不同学科领域的著名科学家组织和建立的,其宗旨是开展跨学科、跨领域的研究,他们称作复杂性研究。他们认为事物的复杂性是从简单性发展来的,是在适应环境的过程中产生的。他们把经济、生态、免疫系统、胚胎、神经系统及计算机网络等称为复杂适应系统(complex adaptive system),认为存在某些一般性的规律控制着这些复杂适应系统的行为。^{21,22}他们的这种认识体现了现代科学技术发展的综合趋势,反映了不同科学领域的共识。尽管对复杂性的看法还众说纷纭,但从方法论来看,对许多复杂事物的深入研究,长期来卓有成效的还原论是处理不了的,这点已基本趋于一致。当前,物理领域、生物领域、社会经济领域差不多发出了共同的呼声:突破还原论。美国《科学》(Science)杂志于 1999 年 4 月 2 日发表了一个题为“复杂系统”的专辑,邀请了物理、化学、生物、经济、生态环境、神经科学等方面的 8 位科学家,撰写了他们所从事的领域中关于复杂系统的研究进展,但两位编者在前言中却以“超越还原论”为标题,就说明了这个形势。²³当今,复杂性研究和系统科学,虽然在研究的范围、侧重面以及总体框架上有所不同,但无论就具体内容或大的方向来说,相当程度上是一致的,会形成相辅相成的新局面。

1.2.5 系统科学在中国的发展²⁴

系统科学和系统工程在我国的研究应用,早期是从推广应用运筹学开始的。运筹学在我国的发展始于 1955 年。那时,形成了这样一个认识:我国有计划按比例的经济建设十分需要运筹学。1956 年在中国科学院力学研究所建立了我国第一个运筹学研究组;1960 年底,中国科学院力学研究所与中国科学院数学研究所的两个运筹学研究室合并成为数学研究所的运筹学研究室。华罗庚从 60 年代初期起在我国大力推广“统筹法”,取得显著成就;在这同时,随着国防尖端技术科研工作的发展,我国在工程系统的总体设计组织方面也取得了丰富的实践经验。1978 年 9 月,钱学森、许国志、王寿云发表了“组织管理的技术——系统工程”,提出了利用系统思想把运

筹学和管理科学统一起来的见解,迅速产生了强烈的反响,这是在我国推广应用系统工程出现了新局面的标志²⁵。1979年10月,中国科学院,教育部,中国社会科学院,一、二、三、四、五、六、七、八机部,总参,总后,军事科学院、军事学院、国防科委和军兵种的150名代表,在北京举行了系统工程学术讨论会,这次会上我国21名知名科学家联合向中国科协倡议成立中国系统工程学会。钱学森在这次会上作了“大力发展系统工程,尽早建立系统科学的体系”的重要报告,这个报告提出了我国发展系统科学和系统工程的基本途径。1980年11月在北京召开了中国系统工程学会成立大会,表明中国在系统工程的研究和应用进入了一个新的阶段。此后,每两年召开一次全国性学术年会,第十届学术年会于1998年12月在广州召开。每次年会都成了全国系统科学和系统工程工作者交流经验、总结成果的盛会。20年来,中国系统工程学会先后组建了17个下属专业委员会:军事系统工程委员会、系统理论委员会、社会经济系统工程委员会、模糊数学与模糊系统委员会、农业系统工程委员会、教育系统工程专业委员会、科技系统工程专业委员会、信息系统工程专业委员会、交通运输系统工程专业委员会、过程系统工程专业委员会、人一机一环境系统工程专业委员会、决策科学专业委员会、草原系统工程专业委员会、林业系统工程专业委员会、系统动力学专业委员会、法制系统工程专业委员会(筹)、医药卫生系统工程专业委员会(筹)。这些专业委员会的活动,反映在众多学科和领域开展了系统科学与工程的研究和应用。

随着系统工程在社会、经济、科学技术各个方面广泛开展研究应用,系统理论方面的基础研究也有长足的发展。这方面需要特别提出的是,从1986年开始,钱学森亲自指导“系统学讨论班”的学术活动。这个讨论班一直持续至今。这个班的研讨活动,提炼了许多重要概念,总结和提出了系统研究方法,逐步形成了以简单系统、简单巨系统、复杂巨系统(包括社会系统)为主线的系统学(systematology)提纲和内容,明确系统学是研究系统结构与功能(包括演化、协同与控制)一般规律的科学。这个班的活动为系统科学在我国的发展,为系统学的建立作出了重要的基础性的贡献。²⁶20多年来国内学术界众多领域,对系统科学进行了多方面多层次的研究、推广和应用,取得了可喜的成绩,出版了一批文献资料,形成了我国发展系统科学和系统工程的广泛基础和力量。²⁷

80年代中期,差不多与美国圣菲研究所开展复杂性研究的同时,在钱

学森的指导和参与下,我国对社会经济系统等复杂系统进行了研究,提炼与总结出开放的复杂巨系统概念,以及处理这类系统的方法论,即从定性到定量的综合集成法,并于1990年初正式发表了“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”,我国经过十多年的努力,开始在研究的前沿提出自己独创性的理论。这是我国开展系统科学与系统工程研究与应用的里程碑,在国际上也是前瞻性的成果。²⁸如,钱学森等在文中指出,简单大系统可用控制论的方法,简单巨系统可用统计物理的方法,这些方法还基本上属于还原论的范畴,但开放的复杂巨系统,不能用还原论的方法和由其派生的方法。这个观点直到10年后的今天,才在国际学术界听到类似的提法。前述1999年美国《科学》杂志“复杂系统”专辑的编者用“超越还原论”作为前言的题目,就是一个例证。

20年来,我国系统科学的研究和应用取得了重要的成就,为进一步的发展打下了坚实宽厚的基础。协同学创始人哈肯曾说:“系统科学的概念是由中国学者较早提出的,我认为这是很有意义的概括,并在理解和解释现代科学,推动其发展方面是十分重要的”²⁹,并认为“中国是充分认识到了系统科学巨大重要性的国家之一”³⁰。这也表示了国际系统科学界对我国情况的一种评价。

1.3 系统科学的体系结构和重要地位

系统科学在我国的一个重要发展就是明确提出系统科学的体系结构,这是钱学森的重要贡献。^{31,32}

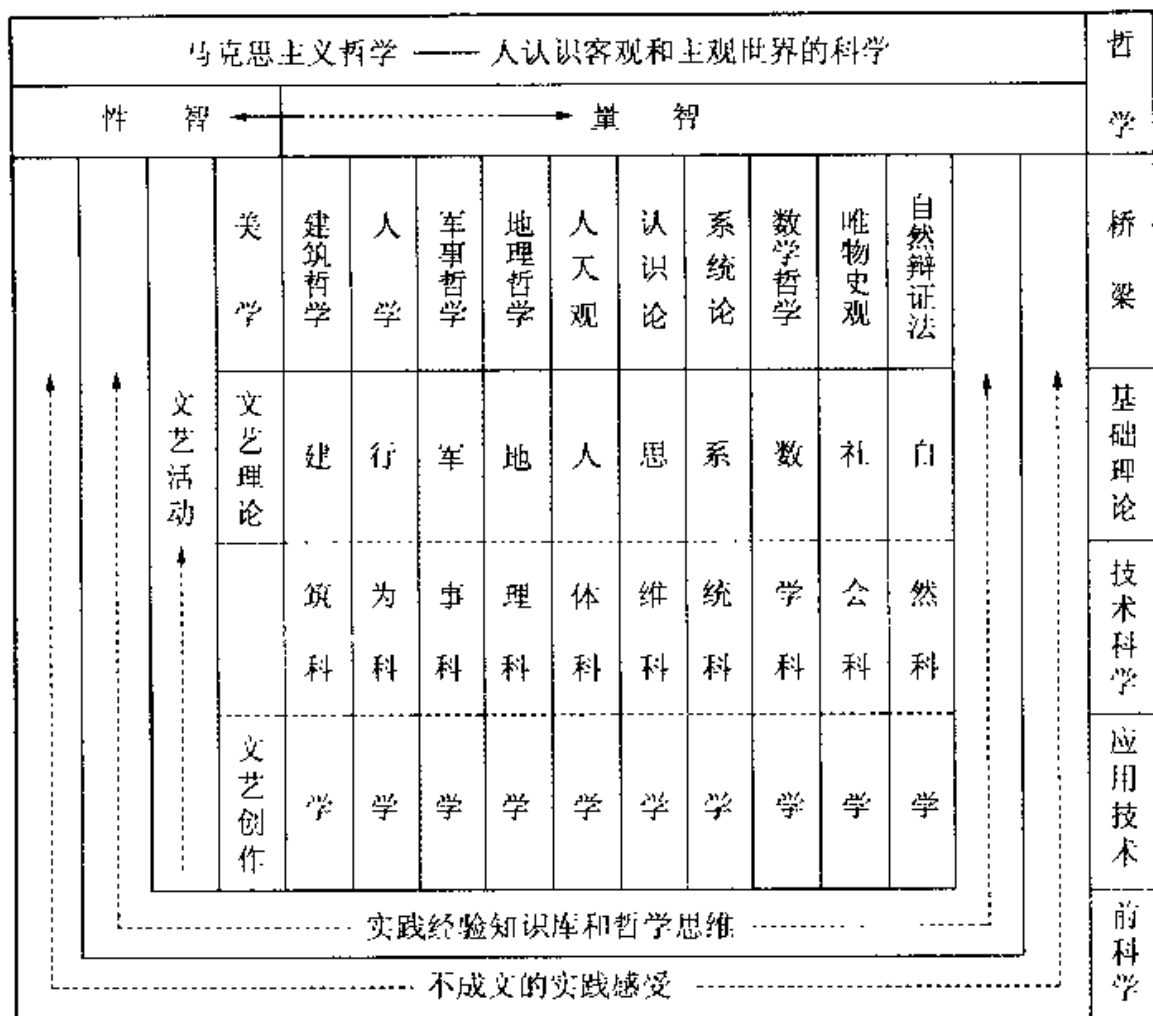
钱学森的系统科学思想,首先表现在他提出的一个清晰的现代科学技术的体系结构。现代科学技术的发展,已经取得了巨大成就。今天人类正探索着从渺观、微观、宏观、宇观直到胀观5个层次时空范围的客观世界。其中宏观层次就是我们所在的地球,又产生了生命、生物,出现了人类和人类社会。如今这些研究已形成了众多的科学领域和学科。据统计,目前国内外已有1000多种研究领域和4000多个学科,今后肯定还将产生出新的学科。但不管有多少种学科,就整体而言,现代科学技术所研究的对象是整个客观世界。客观世界包括自然的和人造的,人也是客观世界的一部分。从不同角度、不同观点以不同方法研究客观世界的不同问题时,现代科学技术又产生了各种不同的科学技术部门。例如自然科学是从物质在时空中的运动、物质运动的不同层次、不同层次的相互关系这个角度来研究整个客观

世界的;社会科学是从人类社会发展运动,即从人类社会内部运动以及人类社会发展和客观世界的相互影响这个角度研究整个客观世界的。钱学森提出了现代科学技术体系的矩阵式结构,这个结构从纵向看首先引入“性智”、“量智”,即客观整体认识和微观定量分析,此下有 11 个大科学技术部门,即:自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、地理科学、军事科学、行为科学、建筑科学、文艺理论。这是根据现代科学技术发展到目前水平所作的划分,今后随着科学技术的不断发展,还会产生出新的科学技术部门,所以,这个体系是个动态发展和开放的系统。

再从横向上来看,每一个科学技术部门里都包含着认识世界和改造世界的知识,而这些知识又处在不同层次上。自然科学经过 300 多年的发展,已形成了 3 个层次,这就是直接用来改造客观世界的工程技术,为工程技术直接提供理论基础的技术科学,以及再往上一个层次,揭示客观世界规律的基本理论,即基础科学。这 3 个层次反应了从认识世界到改造世界的科学技术知识结构。从这个角度来看,它对其他科学技术部门同样也是适用的。唯一的例外是文艺,文艺只是理论层次,实践层次上的文艺创作就不是科学问题,而是属于艺术范畴了。

马克思主义哲学是人类对客观世界认识的最高概括,也是科学技术的最高概括。辩证唯物主义反映了自然界、人类社会和思维发展的普遍规律。因此,现代科学技术的发展,应坚持马克思主义哲学为指导。同时,现代科学技术的发展,又为马克思主义哲学进一步概括和发展提供了丰富的材料,推动着马克思主义哲学的发展。基于马克思主义哲学和科学技术的这种关系,钱学森还提出了上述 11 个大科学技术部门通向马克思主义哲学的 11 座“桥梁”,它们都属于哲学范畴,即:自然科学过渡到马克思主义哲学的桥梁是自然辩证法,社会科学的过渡桥梁是历史唯物主义,数学科学的桥梁是数学哲学,系统科学的桥梁是系统论(或称系统观),思维科学的桥梁是认识论,人体科学的桥梁是人大观,行为科学的桥梁是人学,地理科学的桥梁是地理哲学,军事科学的桥梁是军事哲学,建筑科学的桥梁是建筑哲学,文艺理论的桥梁是美学。这 11 座“桥梁”分别概括了 11 个大科学技术部门中各自带有普遍性、规律性的知识,即各科学技术部门的哲学。

综合以上所述,从感性知识和经验知识,到科学知识(现代科学技术体系),再到哲学,这样 3 个层次的知识,就构成了人类的整个知识体系,见图 1.3.1。



注：此图系钱学森 1993 年 7 月 8 日绘，1995 年 12 月 8 日略作修改，1996 年 6 月 4 日增补。³³

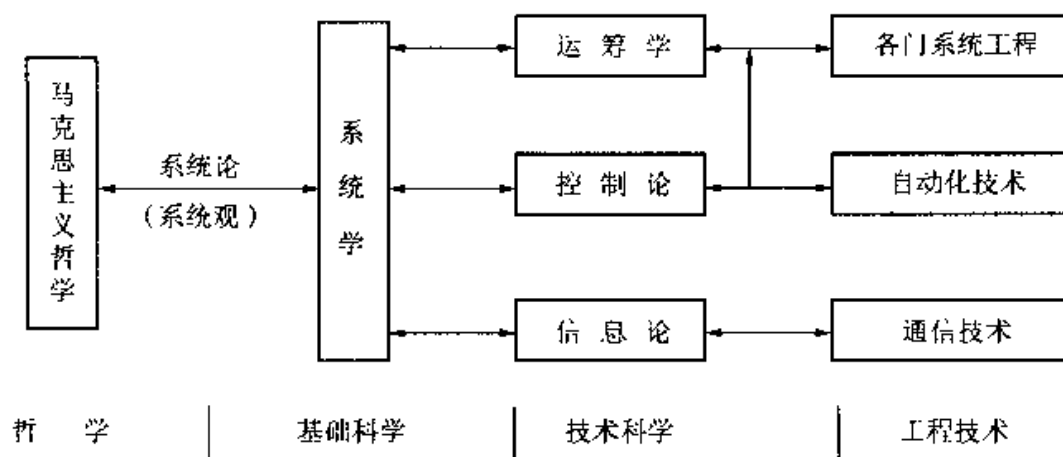


图 1.3.2

是主流方向。今后,学科本身的进一步分化和向微观的方向发展仍很重要。但是进入现代科学时期,向着宏观、交叉和复杂的整体化的趋势发展已成为主流。科学技术发展到今天,人类在探索各种自然现象和社会现象时,必然要面对各式各样包含有大量个体(天体、粒子、原子、分子、生物大分子、细胞、人、社团组织等等)的系统。这些各式各样的个体怎样组织形形色色的系统,较简单的个体运动又怎样组合为较复杂的系统群体行为?这些必然成为当代科学研究的一个基本方向。这些本质上都是系统问题。因此,系统科学必将会有重大发展,将改变科学世界的图景,革新传统的科学认识论和方法论,引起科学思维的革命。

至于事关世界全局的一些重大问题,诸如可持续发展、经济全球化,迫切需要系统科学的观念、理论、方法和技术,可以说,已成国际性的共识了。今天,“系统”的概念如此重要,以至于在美国国家科学教育标准中,要求从幼儿园到 12 年级的教学活动,所有的学生都应培养“系统、秩序和组织”这个概念和过程相关的理解和能力。这里引用美国国家研究理事会所著《美国科学教育标准》一书的一些解释:

自然界和人工界是复杂的,它们过于庞大,过于复杂,不可能一下子研究和领会。为了便于调查研究,科学家和学生要学会定义一些小的部分进行研究。研究的单位称作“系统”。系统是相关物体或构成整体的各个部分的有组织集合。例如生命体、机器、基本粒子、星系、概念、数、运输和教育等都可以构成系统。系统具有边界、构件、资源流(输入和输出)及反馈。

.....

秩序是宇宙中的物质、物体、生命体或事件单元的行为,它可以通过统计学的方法进行描述……在科学中,物体、生命体、系统或事件会受到很多因素的影响,随着有关这些影响因素的知识的增长、随着更多更好的观察结果的出现、随着更好的解释模型的开发,可以减少不确定性的发生。

组织的类型和水平提供了对世界进行思维的有用途径。组织的类型包括元素周期表和生命体的分类……生命系统也有不同的组织水平,例如细胞、组织、器官、生命体、群体和社会。基本单元的复杂性和数量随组织的层次而变。在这些系统内部,各个组成部分之间会发生相互作用。此外,系统在不同的组织水平上可以表现出不同的性质和功能。³⁴

面对当今世界,科学技术迅猛发展,经济全球化,各国的高等学校都在进行教育改革,探索如何培养适应时代要求的人才。加强通才教育,重视文理相通,培养学生学习的主动性和创造性,扩展学生的视野,已成高等教育界的共识。香港中文大学为此于1998年在全校开设了跨院跨系的“通识”课程,特邀全校不同院系的专家讲课。学校并为此组织了通识教育委员会,于1987年5月,包括杨振宁在内的资深博学教师召开了非常讨论会讨论了三周。此课开了两年后,于1999年将授课教材正式出版,书名为《系统视野与宇宙人生》,贯穿全书的基本观念和内容,就是最基本的系统概念和理论³⁵。清华大学为硕士生开设了“系统论研究”(系统科学哲学)课程。中国人民大学将“系统科学”列为文科硕士生必修课。上海大学业已将“系统科学”(系统学)列为全校素质教育公共课程重点教材进行编写。

从上述事例可以看到系统科学在培养人才方面的重要作用。

随着21世纪的到来,科学技术和教育的发展向系统科学提出了新的要求,系统科学学科肩负着重大的历史使命。^{36~40}

第2章 基本概念与方法

系统科学的中心概念是系统,所有其他概念都是用来刻画系统概念的。本章介绍后面各章共同使用的概念,并对系统方法作一概略说明。

2.1 系统、结构、层次

2.1.1 系统

仅就系统自身的规定性看,按照现代系统研究开创者贝塔朗菲的定义,系统(systems)是“相互作用的多元素的复合体”¹。这个定义包含两个逻辑义项。把它稍加精确化,可以表述为:如果一个对象集合中至少有两个可以区分的对象,所有对象按照可以辨认的特有方式相互联系在一起,就称该集合为一个系统。集合中包含的对象称为系统的组分(组成部分),最小的即不需要再细分的组分称为系统的元素或要素。

定义中的义项1规定系统的第一个特点是多元性,系统是多样性的统一、差异性的统一。存在有差别的多个事物,才可能在一定条件下出现整合成为一个系统的要求。组分的多样性和差异性系统是系统“生命力”的重要源泉。最简单的是二元素系统,一般为多元素系统,原则上存在无穷多元素的系统。定义中的义项2规定系统的第二个特点是相关性或相干性,系统中不存在与其他元素无关的孤立元素或组分,所有元素或组分都按照该系统特有的、足以与别的系统相区别的方式彼此关联在一起,相互依存,相互作用,相互激励,相互补充,相互制约。系统必须具有内在相关性或相干性,相关性也是系统“生命力”的重要源泉,差异而不相关的事物构不成系统。这两个特点又决定了系统的另一个更重要的特点:整体性,系统是由它的所有组分构成的统一整体,具有整体的结构、整体的特性、整体的状态、整体的行为、整体的功能等。系统是整合起来的多样性,兼具多样性和统一性两个特点。

系统科学以这样一个基本命题为前提:系统是一切事物的存在方式之一,因而都可以用系统观点来考察,用系统方法来描述。一般地说,现实世界不存在没有任何内在相关性的事物群体,凡群体中的事物必定以某种方

式相互联系,否则不成其为群体。不存在数学意义上的孤立元。一种观点把沙堆看作非系统的群体,但著名的“自组织临界性”理论以沙堆为重要模型,发现了许多深刻的系统规律和机制,表明沙堆是一种具有丰富非线性动力学特性的系统²。

令 A 记系统 S 中全部元素构成的集合。设 S 中把所有元素关联在一起的那些特有方式可以用数学中的关系概念来表述,以 r 记元素之间的关系, R 记所有这种关系的集合, A 中不存在相对于 R 的孤立元,则系统 S 可以形式化地表示如下:

$$S = \langle A, R \rangle \quad (2.1.1)$$

(2.1.1)表示,仅就内部规定性看,系统是由元素集和关系集共同决定的。

在集合论基础上,可以对相当广泛的一类系统作出严格的数学描述。例如,各种代数结构都可以作为某种系统的数学模型。但当组分之间的关联方式复杂得难以用数学关系来描述时,不可能获得系统的形式化描述(2.1.1)。有时虽然可以获得表达式(2.1.1),但往往导致过高的计算复杂度。考虑一个由7个元素组成的系统 S ,设两个元素之间只有一种关系,但元素 a 与 b 的关系一般不同于 b 与 a 的关系,则此网络共有 $7 \times 6 = 42$ 个关系。如果把系统状态定义为该网络当每个关系或者出现或者不出现时所产生的模式,那么,该系统将有 2^{42} 种状态。这就可能导致过高的计算复杂度。总之,在集合论基础上刻划系统并非普遍有效的方法。

本节给出的定义是对系统概念最一般的界定,远未揭示其丰富的内涵,后面将在不同场合从不同角度引出系统的其他定义,以逐步丰富这个基本概念。

2.1.2 结构与子系统

按照定义,系统研究最关心的是把所有元素关联起来形成统一整体的特有方式(包括关联力)。组分及组分之间关联方式(系统把其元素整合为统一整体的模式)的总和,称为系统的结构(structure)。在组分不变的情况下,往往把组分的关联方式就称为结构。这时(2.1.1)中的关系集 R 就是关于一类系统结构的数学描述。

当系统的元素很少、彼此差异不大时,系统可以按照单一的模式对元素进行整合。当系统的元素数量很多、彼此差异不可忽略时,不再能够按照单一模式对元素进行整合,需要划分为不同的部分,分别按照各自的模式组织整合起来,形成若干子系统,再把这些子系统组织整合为整系统。一种最简

单的情形是,由于系统规模太大,必须对元素“分片”管理,因而把整系统分为若干子系统(subsystem),但不同子系统具有相同结构。形式化地说,给定系统 S ,如果它的元素集合 S_i 满足以下条件,则称 S_i 为系统 S 的一个子系统或分系统:

- (1) S_i 是 S 的一部分(子集合),即 $S_i \subset S$;
- (2) S_i 本身是一个系统,基本满足前述系统的要求。

相对于 S_i , S 称为整系统或母系统。

这个定义中的义项 1 规定子系统具有局域性,它只是系统的一部分。义项 2 规定子系统不是系统的任意部分,必须具有某种系统性。应当区分元素和子系统。元素也是系统的组成部分,但本质特征是具有基元性,相对于给定的系统它是不能也无需再细分的最小组成部分,元素不具有系统性,不讨论其结构问题。子系统具有可分性、系统性,需要且能够讨论结构问题。义项 2 中“基本”一词意指,有些子系统可以只有一个元素,子系统对母系统具有相对的独立性。元素和子系统都是系统的组成部分,简称组分。

组织和结构是两个有差别的概念。只要组分之间存在相互作用,就有系统结构。但有结构不等于有序。在相对的意义,结构分为有序的和无序的两大类。处于热平衡态的气体系统的元素(分子)由分子力相互作用,不停地随机碰撞,形成特定的系统结构,但属于无序结构。组织仅指有序结构,有组织的系统就是具有有序结构的系统。处于热平衡态的系统是一种未加组织的混乱系统,却是有结构的整体;在一定条件下这些分子自动地或被动地组织起来,形成某种有序结构,如贝纳尔图样(Bénard pattern),就转化为有组织的系统。这是系统演化理论研究的内容,我们将在第 3 章至第 9 章讨论。

结构分析的重要内容是划分子系统,分析各个子系统的结构(元素及其关联方式和关联力),阐明不同子系统之间的关联方式。一般来说,同一系统可以按照不同标准划分子系统,以便从不同侧面了解系统结构。按照同一标准划分出来的子系统有可比性,按照不同标准划分出来的子系统没有可比性。把按照不同标准划分得到的子系统并列起来,是概念混淆的重要原因。

系统的结构方式无穷无尽,目前尚无完备的结构分类方法。一般情况下,应注意从以下两方面对系统作结构分类。

- (1) 框架结构与运行结构 当系统处于尚未运行或停止运行的状态时

各组分之间的基本联接方式,称为系统的框架结构。系统处于运行过程中所体现出来的组分之间相互依存、相互支持、相互制约的方式,称为系统的运行结构。

(2) 空间结构与时间结构 组分在空间的排列或配置方式,称为系统的空间结构(spatial structure)。组分在时间流程中的关联方式,称为系统的时间结构(temporal structure)。有些系统主要呈现空间结构,有些系统主要呈现时间结构,有些系统兼而有之,后者称为时空结构(spacetime structure)。

2.1.3 整体与涌现性

整体与部分是系统科学的一对重要范畴,系统科学着眼于考察系统的整体性(wholeness)。

若干部分按照某种方式整合³ 成为一个系统,就会产生出整体具有而部分或部分总和所没有的东西,如整体的形态、整体的特性、整体的行为、整体的状态、整体的功能、整体的困难、整体的机遇、整体地解决问题的途径等。一旦把系统分解为它的组成部分,这些东西便不复存在。就是说,系统与组分或子系统相比有质的提升,新的飞跃。系统科学把这种整体才具有、孤立的部分及其总和不具有的特性,称为整体涌现性(或称突现性, whole emergence)。例如,单个物质分子没有温度、压强可言,大量分子聚集为热力学系统,就具有可以用温度、压强表示的整体属性。一台安装好的机器具有它的全部零件总和所没有的功能。全球经济一体化同时带来发生全球金融动荡的危险,要求采取全球防范措施。所有这些都是系统整体具有而部分及其总和不具有的特性,是部分被整合成为系统后在整体上涌现出来的新特性,是系统科学意义上的质变。

组分多少,代表系统的规模。规模大小不同所带来的系统性质的差异,称为规模效应。在最简单的情形下,整体涌现性是一种规模效应,整体特性与系统的规模即组分多少有关,没有必要的规模,无法产生必要的整体效应。从小系统到大系统,规模的增大导致系统性质的显著差别,描述和处理的方法有明显的不同。第6章将看到,当规模增大到所谓巨系统时,即使元素之间的关系非常简单,也会出现一些本质上全新的系统特性和行为。

就系统自身看,整体涌现性主要是由它的组成成分按照系统的结构方式相互作用、相互补充、相互制约而激发出来的,是一种组分之间的相于效应,即结构效应、组织效应。不同的结构方式,即组分之间不同的相互激发、相互制约方式,产生不同的整体涌现性。典型例子是同样的原子成分按照

不同结构方式经过化学反应形成性质不同的分子;由同样的成员组成的企业按照不同方式组织和管理,可能产生截然不同的生产效益。系统的整体属性也取决于组分的特性,并非任意一组元素经过组织、整合就能产生某种整体涌现性,任意挑选6名队员,再高明的教练也不可能训练出一支世界级排球队。一定的整体性要以一定的组分属性为基础。

整体涌现性的通俗表述,就是“整体大于部分之和”,从整体中必定可以发现某些在部分中看不到的属性和特征。按照西蒙(A. Simon)的说法,就是“已知部件的性质和它们相互作用的规律,也很难把整体的性质推断出来”。⁴在特殊情况下,当整体与部分具有同质的特性、可以进行量的比较时,整体涌现性就是“整体不等于部分之和”,可以用公式表示为

$$W \neq \sum p_i \quad (2.1.2)$$

其中, W 代表整体, $\sum$ 为加和符号, p_i 代表系统的第*i*个部分。(2.1.2)意指整体不等于部分之和,合理的结构方式产生正的结构效应,整体将大于部分之和;不合理的结构方式产生负的结构效应,整体将小于部分之和。每个系统都表现出特有的、能与别的系统区分开来的整体涌现性。研究系统,就是要了解系统特有的整体性质。整体观点是系统思想最核心的观点,系统科学是关于整体性的科学。

整体涌现性是由规模效应和结构效应共同产生的,一般来说起决定作用的是结构效应。不论自然界自行组织而成的系统,还是人工组建、制造的系统,涌现与系统整体总是相伴而生,一旦形成系统立即涌现出特有的整体特性,系统解体立即丧失其整体特性。整体性与涌现性是同一事物的两面,前者是以既成论观点看问题的结果,贝塔朗非采用亚里士多德(Aristotle)“整体大于部分之和”的说法表示;后者是从生成论观点看问题的结果,采用霍兰(J. Holland)“多来自少”⁵的说法表示。老子《道德经》关于“道生一,一生二,二生三,三生万物”的说法,是生成论的最早表述。

整体涌现性也就是非还原性或非加和性,即整体具有但还原为部分便不存在的特性,或把部分特性加和起来无法得到的特性。承认一切系统都有非加和性,并非否定系统不能在某些方面表示出加和性。例如,物质系统整体的质量等于各部分的质量之和,一个单位的工资总额等于它的职工工资的加和,都是加和特性。所以,系统性应是加和性与非加和性的统一。涌现性都是整体属性,但整体性不一定是涌现性。

鉴于元素特性、数量(系统规模)特别是结构方式的不同,整体涌现性在

质和量上千差万别,产生出现实世界无穷多样的系统。系统科学是探索整体涌现性发生的条件、机制、规律以及如何利用它来造福人类的方法的知识体系。

2.1.4 层次

涌现性的另一种解释是高层次具有低层次没有的特性。新层次根源于出现了新的涌现性,有不同层次必有不同水平的涌现性。最简单的系统由元素层次和系统整体层次组成,元素之间的相互作用直接涌现出整体特性,无需经过中间层次的整合。复杂系统不可能一次完成从元素性质到系统整体性质的涌现,需要通过一系列中间等级的整合而逐步涌现出来,每个涌现等级代表一个层次,每经过一次涌现形成一个新的层次,从元素层次开始,由低层次到高层次逐步整合、发展,最终形成系统的整体层次。层次是系统由元素整合为整体过程中的涌现等级,不同性质的涌现形成不同的层次,不同层次表现不同质的涌现性。

一般来说,低层次隶属和支撑高层次,高层次包含或支配低层次。高层次必有低层次没有的涌现性,一旦还原为低层次,这种涌现性就不复存在。多层次是复杂系统必须具有的一种组织方式,层次结构是系统复杂性的基本来源之一。简单系统无需划分层次就可以把它的各部分有效地组织起来,复杂系统则不行,必须按层次方式由低级到高级逐步进行整合,首先对元素整合,形成许多子系统,再对这些子系统进行整合,形成较高级的子系统,一直到形成系统整体。在按照多个层次组织起来的系统中,不同层次的子系统有高低不同的涌现性,较大的子系统一般也分层次。在这种系统中,层次提供了一个参照系,讨论问题首先要明确是在哪个层次上,混淆层次(如把不同层次的子系统相提并论)必将导致概念混乱。

出现新的涌现性不一定产生新的层次。由相同元素组成的系统在内外因素作用下改变了结构,必然丧失原结构对应的涌现性,出现由新结构决定的另一种涌现性,却没有形成新的层次。以激光器为例,在控制参量越过第一个临界值时涌现出激光这种新性质,在控制参量越过第二个临界值时涌现出脉冲光这种新性质,两者之间并非层次的差别。这种情形大量存在。只有当某个已经形成的层次上出现了大量系统,以它们为子系统作进一步的整合而形成新的更高级的系统时,才会涌现出新的层次。

从层次观点看,每种涌现性都是从低层次事物的相互作用中激发提升起来的,如同泉水从地下(低层次)冒出来一般。对于自行组织起来的系统,

涌现性可以称为“自涌性”。但不应把涌现与自涌等同起来,因为人工系统也有整体涌现性。

层次是系统科学的基本概念之一,认识系统结构的重要工具,层次分析是结构分析的重要方面。系统是否划分层次,层次的起源,分哪些层次,不同层次的差异、联系、衔接和相互过渡,不同层次的相互缠绕,层次界限的确定性与模糊性,层次划分如何增加了系统的复杂性,层次结构的系统学意义,层次结构设计的原则等,是层次分析要回答的问题。

2.1.5 系统的分类

撇开组分的具体基质,仅仅把对象看作系统,主要是从以下方面来区分不同的系统:

- (1) 按照系统规模划分,有小系统(little system)、大系统(large system)、巨系统(giant system)三类;
- (2) 按照系统结构简单与否划分,有简单系统(simple system)和复杂系统(complex system)两类。

一般来说,小系统和大系统都属于简单系统,巨系统可能是简单的,也可能是复杂的。把这两个标准结合起来进行分类,就得到钱学森关于系统的一种完备分类(见图 2.1.1)。

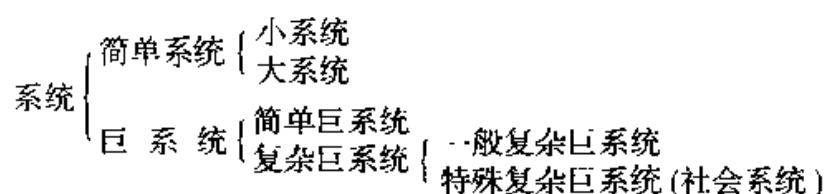


图 2.1.1 系统的分类

本书的基本框架是按照上述系统分类设计的。系统理论还需要按照系统的结构、特性、行为、功能等进行分类,我们将逐步进行介绍。

2.2 环境、行为、功能

2.2.1 系统的环境

一个系统之外的一切与它相关联的事物构成的集合,称为该系统的环境(environment)。更确切地说,系统 S 的环境 E 是指 S 之外一切与 S 具有不可忽略的联系的事物集合,即

$$E_s = \{x \mid x \in S \text{ 且与 } S \text{ 具有不可忽略的联系}\} \quad (2.2.1)$$

“不可忽略”是一个模糊用语,不能作非此即彼的理解。(2.2.1)表明,系统的环境只能在相对的意义确定。在不同的研究目的下,或对于不同的研究者,同一系统的环境划分也有不同。

任何系统都是在一定的环境中产生出来,又在一定的环境中运行、延续、演化,不存在没有环境的系统。系统的结构、状态、属性、行为等或多或少都与环境有关,这叫做系统对环境的依赖性。环境与系统之间的相互关系是系统的外部规定性。同样的元素在不同环境中须按照不同方式整合,形成不同的结构,甚至元素的性质也随着环境的变化而有所变化。一般来说,环境也是决定系统整体涌现性的重要因素,在一定的环境条件下,系统只有涌现出特定的整体性,才能与环境相适应,形成稳定的环境依存关系。随着环境的改变,系统须产生新的整体涌现性,以达成新的环境依存关系。环境复杂性是造成系统复杂性的重要根源。因此,研究系统必须研究它的环境以及它同环境的相互作用。环境意识是系统思想的另一个基本点。

与系统相比,环境组分之间相互联系一般较弱,不够规则,系统性较差,这为系统趋利避害、保护和发展自己提供了可能性。但同一系统的环境中的不同事物之间总有这样或那样的联系,并且通过与该系统的联系而形成某种更大的系统。应当用系统观点认识环境,要看到有些系统的环境有很强的系统性。把环境当作系统来分析,是系统观点的必要组成部分。

2.2.2 系统的边界

把系统与环境分开来的东西,称为系统的边界(boundary)。从空间看,边界是把系统与环境分开来的所有点的集合(曲线、曲面或超曲面)。从逻辑上看,边界是系统的形成关系从起作用到不起作用的界限,规定了系统组分之间特有的关联方式起作用的最大范围。边界的存在是客观的,凡系统都有边界。但有些系统具有明确的边界,有些系统的边界并不明确。一般来说,机械系统、物理系统、生命个体、行政区划、国家、符号系统的边界是明确的,社会中的经济系统、文化系统、教育系统 etc 难以给出明确的边界。某些复杂系统的边界有模糊性,元素从属于它到不属于它是逐步过渡而非“一刀切”的。在有些情况下,不同系统在其相邻部分相互渗透,你中有我,我中有你,无法通过有限的步骤明确地划分开来。

从事物相互联系的观点看,任何系统都是从环境中相对划分出来的。在科学层面上,首先应当承认系统与环境之划分的确定性,系统内部与外部差别的确定性,但这种确定性有程度的不同,系统与环境的划分有相对性。

对于具有明确边界的系统,可以不考虑这种划分的相对性。对于边界不明确的系统,考虑这种相对性是必要的。这时,可以把系统定义为:按照所关心的问题从千丝万缕互相联系的事物中相对孤立出来作为研究对象的一部分事物。在这种情形下应用系统方法,对象系统的划分常常因人而异,需特别谨慎,力求最大限度地排除主观因素。

2.2.3 开放性与封闭性

系统与环境的相互联系、相互作用是通过交换物质、能量、信息实现的。系统能够同环境进行交换的属性称为开放性(openness),系统阻止自身同环境进行交换的属性称为封闭性(closeness)。这两种性质对系统的生存发展都是必要的。一个系统,特别是生命、社会、思维系统,只有对环境开放,同环境相互作用,同外部交换物质、能量、信息,才能生存和发展。开放得越充分有效,越有利于系统的生存发展。开放不够,系统生存发展将受到影响,严重时能使系统处于病态或者解体。封闭性亦非单纯的消极因素,而是系统生存发展必要的保障条件。从环境输入系统的并非都对系统有利,什么东西不能输入,什么东西需要输入,输入多少,如何输入,都需要管理控制。系统对环境的输出也不是任意的,什么东西不允许输出,什么东西允许输出,输出的数量和方式,都需管理控制。管理控制不健全,系统不能正常生存发展。总之,系统性是开放性与封闭性的适当统一。

按照系统与环境的关系,可以把系统分为两类。与环境有物质、能量、信息(或者至少其中之一)交换的是开放系统,与环境没有任何交换的是封闭系统。实际系统或多或少都同环境有交换,因而都是开放系统。但有些系统与环境的交换极其微弱,可以忽略不计,看作封闭系统。系统科学是关于开放系统的科学,基本不涉及封闭系统。

边界概念有助于理解开放系统与封闭系统的区别。封闭系统的边界是完全封闭的、连续的,没有可以进出的通道;开放系统的边界往往有间断点,具有可以进出的通道。封闭系统的边界具有刚性和不可渗透性,开放系统的边界具有柔性和可渗透性。

2.2.4 系统的行为

系统相对于它的环境所表现出来的任何变化,或者说,系统可以从外部探知的一切变化,称为系统的行为(behavior)。行为属于系统自身的变化,是系统自身特性的表现,但又同环境有关,反映环境对系统的作用或影响。

不同系统有不同的行为,同一系统在不同情况下也有不同的行为。系

统有各种各样的行为:维生行为,学习行为,适应行为,演化行为,自组织行为,平衡行为,非平衡行为,局部行为,整体行为,稳定行为,不稳定行为,临界行为,非临界行为,动态行为,等等。可以说,系统科学是研究系统行为的科学。

2.2.5 系统的功能

功能(function)是刻画系统行为、特别是系统与环境关系的重要概念。系统的任何行为都会对环境产生影响。系统行为所引起的、有利于环境中某些事物乃至整个环境存续与发展的作用,称为系统的功能。被作用的外部事物,称为系统的功能对象。功能是系统行为对其功能对象生存发展所作的贡献。

凡系统都具有功能。发动机的功能是为车辆或飞行器提供推力。学校的功能是为社会培养人才和提供科研成果。系统的整体涌现性,起码要体现在功能上,整体的功能不等于部分的功能之总和。一般来说,整体应具有部分及其总和所没有的新功能。功能是一种整体特性,只要把元素整合为系统,就具有元素总和没有的功能。

有了功能概念,可以从一个新的角度给系统下定义:“所谓系统,是由相互制约的各个部分组成的具有一定功能的整体。”⁶同贝塔朗菲的定义比较,这一定义强调的是系统具有“一定的功能”,特别适用于技术科学层次的系统理论和系统工程,因为人们研究、设计、控制系统都是为了获得预定的功能。

功能概念也常用于子系统,指子系统对整系统存续发展所负责任、所作贡献。如果子系统是按照它们在整系统中的不同功能划分出来的,按照各自的功能相互关联、相互作用、相互制约,共同维持系统整体的生存发展,就把功能子系统的划分及其相互关联方式称为系统的功能结构。复杂系统都有自己的功能结构,了解功能结构是把握系统特性的重要方面。人体、社会都是典型的具有功能结构的复杂系统,了解这类系统的属性和行为必须了解它的功能子系统。简单系统的子系统可以不按功能来划分,仅仅由于规模太大(元素太多)不便统一管理而划分为若干子系统来分别管理。贝纳尔流体在出现六角形元胞前(即所谓热力学分支解)没有子系统划分,在临界点发生远离平衡条件下的相变后,出现不同的元胞,意味着已被划分为许多子系统。但不同子系统没有功能上的区别,只是由于新产生的分子之间长程关联的程长只有元胞半径的尺度,必须划分为一个个元胞分别对其中的

分子进行组织,整个流体系统没有形成功能结构。

应当区分系统的功能与性能(performance)。性能指系统在内部相干和外部联系中表现出来的特性和能力。性能一般不是功能,功能是一种特殊的性能。可以流动是水的性能,利用这种性能搞运输是它的功能。燃烧效率是发动机的性能,提供推力才是发动机的功能。性能是功能的基础,提供了系统发挥功能的客观依据;功能是性能的外化,只能在系统行为过程中表现出来,在系统作用于对象的过程中进行观测评价。性能可以在系统与对象分离的条件下观测评价。同一系统有多种性能,每一种性能都可能用来发挥相应的功能,或综合几种性能来发挥某种功能。系统性能的多样性决定了系统功能的多样性。

功能与结构关系密切。但系统的功能由结构和环境共同决定,而非单独由结构决定。简单地说结构决定功能,并视之为基本系统原理之一,容易造成误解。系统的功能与环境有很大关系。首先是功能对象的选择,只有用于本征对象,系统才能发挥应有的功能,作为代用品用于非本征功能对象的系统一般无法充分发挥其功能。所谓“人尽其才,物尽其用”,就是要把系统用于它的本征功能对象。系统功能的发挥还需要环境提供各种适当的条件、氛围,为充分发挥系统功能,需适当选择、营造、改善环境。只有当环境给定后,才可说结构决定功能。就人造系统而言,常常是在元素和环境都给定的情况下设计或运营的,能够发挥人的能动性的主要是设计、改造系统的结构,结构的优劣就成为决定性的因素。同样的元素,不同的结构方案,可能制造或组建出功能显著不同的系统。

2.3 状态、演化、过程

2.3.1 系统状态

状态(state)是系统科学常用而不加定义的概念之一,指系统的那些可以观察和识别的状况、态势、特征等。例如,人体系统有健康态与疾病态、常态与竞技态(超常态)、清醒态与睡眠态等,经济系统有它的繁荣态、萧条态、危机态、复苏态等。能够正确区分和描述这些状态,就算把握了系统。状态是刻画系统定性性质的概念,但状态一般可以用若干称为状态量的系统定量特性来表征。一个理想气体系统的状态可以用温度 T 、压强 p 、体积 V 等量化概念表征。人体系统、一般生物系统、社会系统都可以用适当的状态量来描述。

系统的状态量可以取不同的数值,称为状态变量(state variable)。最简单的是可以用一个状态变量描述的系统,一般系统需要同时用若干状态变量来描述。给定状态变量的一组数值就是给定一个系统状态,不同组的数值代表系统的不同状态。例如,给定一组 T 、 p 、 V 数值就是给定理想气体系统的一个状态。一般来说,同一系统可以用不同的状态变量组描述,状态变量的选择有一定的自由度。所选择的状态变量必须具有特定的系统意义,能表征所研究系统的基本特性和行为,因而随系统的不同而不同。状态变量的选择应满足以下一般要求:(1) 完备性,状态变量足够多,能够全面刻画系统状态;(2) 独立性,任一状态变量都不能表示为其他状态变量的函数。

状态变量总是在一定的范围即定义域内变化的(取不同数值),但不一定随时间而变化。状态变量不随时间而变化的系统,称为静态系统(static system)。状态变量 x 随时间而变化的系统,即可以表示为时间 t 的函数 $x(t)$,称为动态系统(dynamic system)。两类系统都是系统科学研究的对象,已积累了丰富的内容。原则上说,只要时间尺度足够大,总可以观察到状态变量随时间而改变,因而一切系统都是动态的。但就给定的研究目标(问题)和条件来说,如果系统的特征时间尺度比所研究的具体问题的特征时间尺度大得多,在研究和解决问题期间系统状态没有明显变化,就应当把系统看作静态的,这样可以大大简化对系统的描述。

无论静态系统还是动态系统,基本课题是在状态空间(state space)中研究系统的状态转移。静态系统是基于这样一个假设而对系统的简化描述:在状态空间中从一个状态向另一个状态的转移无需耗费时间,可以瞬间完成。动态系统的特点是,在状态空间中从一个状态向另一个状态的转移不可能瞬间完成,必须耗费一定的时间,即呈现出状态随时间而变化的特征。这种变化在式样、特征、程度、速度等方面都表现出无穷多样性,使得动态系统理论比静态系统理论的内容丰富、多样、复杂得多。刻画动态特性要比刻画静态特性困难得多。基础科学层次的系统理论,本质上是研究系统动态特性(传统科学称为动力学特性)的。技术科学层次的某些系统理论,特别是控制系统理论,也着重研究系统的动态特性。

鉴于动态特性的重大意义,可以采用比尔(S. Beer)的系统定义:“系统是具有动力学联系的诸元素之内聚统一体。”⁷ 定义规定系统元素之间的联系是内在的、有凝聚力的、协调一致的,特别强调这种联系是动力学的而非

静力学的。系统整体所显示的一切动力学性质首先来自系统内部,来自元素之间的动力学相互作用。同时也来自环境本身的动态变化,来自系统与环境的动力学相互作用。比尔的定义没有考虑后一方面,反映了目前动态系统理论的局限性。元素之间的动力学相互作用、环境的动力学变化必然通过系统整体的状态、特性、行为表现出来。直接刻划元素之间的动力学相互作用几乎是不可能的,可行的做法是刻划系统的整体状态、行为、特性的动力学变化,我们将在第3、第4两章中讨论。

2.3.2 系统的演化

系统的结构、状态、特性、行为、功能等随着时间的推移而发生的变化,称为系统的演化(evolution)。演化性是系统的普遍特性。只要在足够大的时间尺度上看,任何系统都处于或快或慢的演化之中,都是演化系统。有些系统在一定研究范围内看不到变化,只需研究它们的共时性特征,可以当作非演化系统。但就主体部分看,系统科学是关于事物演化的科学。本书的基本内容都是有关系统演化问题的。

系统演化有两种基本方式。狭义的演化仅指系统由一种结构或形态向另一种结构或形态的转变。广义的演化包括系统从无到有的形成(发生),从不成熟到成熟的发育,从一种结构或形态到另一种结构或形态的转变,系统的老化或退化,从有到无的消亡(解体)等。系统的存续也属于广义演化,因为存续期间系统虽然没有定性性质的改变,定量特征的变化是不可避免的。

系统演化的动力有来自系统内部的,即组分之间的合作、竞争、矛盾等,导致系统规模改变,特别是组分关联方式的改变,进而引起系统功能及其他特性的改变。组分的增加,系统规模的增大,或多或少要引起组分关联方式(包括关联力)的改变。系统演化的动力也来自外部环境,环境的变化及环境与系统相互联系和作用方式的变化,都会在不同程度上导致系统内部发生变化,包括组分特性、结构方式的改变,甚至包括组分的新陈代谢,最终导致系统整体特性和功能的变化。一般来说,系统是在内部动力和外部动力共同推动下演化的。

系统演化有两种基本方向,一种是由低级到高级、由简单到复杂的进化,一种是由高级到低级、由复杂到简单的退化。现实世界的系统既有进化,也有退化。两种演化又是互补的。系统进化的总方向是越来越复杂,从简单系统进化到复杂系统,关键是潜在的中间稳定形态的数目和分布。先

产生稳定的中间形态,再逐步产生更复杂的形态,是实现可能性最大的进化方式。

2.3.3 系统与过程

只要观察的时间尺度足够大,就可以看到任何系统都是作为过程而展开的。凡演化都是过程,包括系统的发生过程,发育过程,相变(从一种结构变为另一种结构)过程,老化过程,消亡过程等。系统的生存延续,系统的运行,系统功能的发挥,都是作为过程而进行的。在这个意义上,凡系统都应作为过程来研究。但是,在每种具体情况即特定的时间尺度下,有些系统变化显著,必须作为过程来考察,有些系统几乎看不到明显的变化,作为过程看待反而显得牵强,不利于抓住系统的主要特征。

研究过程,时间是一个至关重要的因素。过程是在时间维中展开的。时间是一种算子,一切事物都是它的运算对象,在时间算子作用下发生变化。在现代科学中,有不同意义上的时间。最简单的是经典动力学意义上的时间,在系统的描述中时间 t 只是一个外在的几何参数,没有方向,过去与未来是对称的。从牛顿力学到相对论和量子力学,基本运动方程都是时间反演对称的,即用 $-t$ 代替 t ,所看到的情景没有区别。例如牛顿方程

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.3.1)$$

其中 t 代表可逆时间,时间之矢(arrow of time)没有意义,如果交换过去与未来,此定律的形式即它所描述的系统行为不发生变化。

但是,对于热力学、统计物理学、自组织理论等描述的系统,时间具有方向性,过去与未来不再对称。例如,描述热传导的傅里叶(Fourier)方程

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = -\rho \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.3.2)$$

其中 $T(x, t)$ 代表 t 时刻 x 点的温度, $\rho (>0)$ 为热传导系数。用 $-t$ 代替 t , 运动方程将变号,表明它所刻划的系统行为具有时间反演不对称性,时间之矢有意义。时间之矢概念对于研究系统演化至关重要,因为系统演化是有方向的,时间之矢指向于系统演化的方向。

按照数学特性对过程进行分类,有连续过程与离散过程,线性过程与非线性过程,确定性过程与随机过程,平稳过程与非平稳过程,有记忆过程与无记忆过程,等等。按照系统特性看,过程的一种重要分类是看它是否为时间可逆的。人们熟悉的理想摆运动是可逆过程的典型,向前看与向后看没

有区别。物质扩散和热扩散是不可逆过程的典型。一滴墨汁滴入水中会自动散开,直至同水均匀混合。热量总是自发地从高温处向低温处流动,直到温度处处相同。除非有特定的外部干预,相反的过程不会自发出现。两种过程都存在于现实世界,但不可逆过程(irreversible process)更为普遍和根本,可逆过程(reversible process)实际是某些不可逆性微弱的过程忽略了不可逆性的理想化模型。系统科学主要研究不可逆过程,系统演化理论是关于不可逆过程的理论。

过程必定具有过程结构。每个过程都由若干子过程(阶段、步骤、程序等)组成,子过程还可能进一步划分,一直到不能再分的过程元素,称为动作。不同子过程、不同动作之间的基本关系是如何排列前后次序及相互衔接,形成某种过程结构。复杂的过程包括大量不同的子过程、程序、动作,其中有些可以同时进行,有些可以穿插进行,有些允许中间有停顿,形成纵横交错的复杂网络结构。整体性观点应用于过程系统,就是全过程观点,从全过程出发协调各个动作、程序、阶段、子过程的关系,使全过程运行优化。

2.4 系统方法论

凡是用系统观点来认识和处理问题的方法,亦即把对象当作系统来认识和处理的方法,不管是理论的或经验的,定性的或定量的,数学的或非数学的,精确的或近似的,都叫做系统方法。在系统科学的不同层次上,以及系统科学的不同学科分支之间,系统方法既有共同点,也有相异之处。本节拟对适用于不同层次和分支的系统方法作方法论的阐述。

2.4.1 系统方法的哲学基础

系统科学是适应科学方法论的变革而产生的新学科,系统研究的方法论是新型科学的方法论,不应是仅仅把自然科学和社会科学的现有方法简单地推广套用于系统研究,必须立足于创新。但系统研究的方法不能脱离现代科学成果凭空创造,只能在对现有科学方法加以吸收、提炼、改造的基础上创建出来,同现有科学的方法论有多方面的联系。学习系统方法,既要注意这种联系,更要把握其间的区别,思想上有了创新精神,才易于掌握系统科学方法。

任何科学方法论都有它的哲学基础。系统科学第一批学科分支的开创者们,如一般系统论的创立者贝塔朗菲,控制论的创立者维纳和阿什比(W. R. Ashby),信息论创立者之一的韦弗(W. Weaver),运筹学创立者之一的丘

奇曼(C. W. Churchman),都很重视哲学思考,努力从哲学上论证本分支学科的方法论。60年代以来建立的系统理论,如普利高津的耗散结构理论,哈肯的协同学,托姆的突变论,艾根的超循环论,费根鲍姆(M. J. Feigenbaum)等人的混沌学,芒德布罗(B. Mandelbrot)的分形学,钱学森的系统学,同样重视对方法论作哲学探讨。就是那些主要从事系统方法应用的学者,他们的注意力也不仅仅放在具体的操作步骤和程序上,同时也关注支配这些步骤和程序的哲理精神。就国外系统方法论研究几十年来的动向看,对哲学、社会学、心理学、认知理论和组织行为理论的探求已占有比可操作性更中心的位置。不少系统方法论名家,如切克兰德(P. B. Checkland)和比尔,都强调方法论的精髓在于掌握其哲理精神,而不是机械地死扣其建议的操作步骤。⁸学习系统科学,从事系统研究,需要有哲学思考的自觉性。

系统方法论的哲学依据,归根到底是唯物辩证法。某些西方系统科学家不愿公开承认这一点,但他们的工作成就实质上都得益于辩证法。多数系统科学大家明确承认辩证法对系统研究的指导作用。贝塔朗菲承认马克思的辩证法对今天被称为一般系统论的理论观念的发展作出了自己的贡献⁹。丘奇曼预言未来的系统分析必定会提出一种新的哲学,其“主旨概念将是辩证的学习过程”¹⁰。普利高津主张,“我们需要一种更加辩证的自然观”¹¹。哈肯在谈到协同学的“哲学方面”时,明确应用了对立统一、量变质变等辩证法规律¹²。钱学森更是不遗余力地宣传系统科学必须以马克思主义哲学为指导,自觉地应用辩证法于系统研究。几十年来,中国系统科学界始终坚持以唯物辩证法来指导系统研究和教学。

辩证法的核心是对立统一。用之于系统研究,就是强调还原论方法和整体论方法的结合,分析方法与综合方法的结合,定性描述与定量描述的结合,局部描述与整体描述的结合,确定性描述与不确定性描述的结合,静力学描述与动力学描述的结合,理论与经验方法的结合,精确方法与近似方法的结合,科学理性与艺术直觉的结合,等等。这些结合是系统论方法之精髓所在。

2.4.2 还原论与整体论相结合

古代科学的方法论本质上是整体论(holism),强调整体地把握对象。近400年来科学遵循的方法论是还原论(reductionism),主张把整体分解为部分去研究。古代的整体论是朴素的、直观的,没有把对整体的把握建立在对部分的精细了解之上。随着以还原论作为方法论基础的现代科学兴起,这种

整体论不可避免地被淘汰了。

还原论科学并非完全不考虑对象的整体性问题。作为还原论方法的奠基者之一,笛卡尔(R. Descartes)主要是从如何研究整体才算是科学方法的角度论证还原的必要性的。还原论的一个基本信念是,相信客观世界是既定的,存在一个由所谓“宇宙之砖”构成的基本层次,只要把研究对象还原到那个层次,搞清楚最小组分即“宇宙之砖”的性质,一切高层次的问题就迎刃而解了。由此强调,为了认识整体必须认识部分,只有把部分弄清楚才可能真正把握整体;认识了部分的特性,总可以据之把握整体的特性。在这个意义上,还原论方法也是一种把握整体的方法,即所谓分析—重构方法。但居主导地位的是分析、分解、还原:首先把系统从环境中分离出来,孤立起来进行研究;然后把系统分解为部分,把高层次还原到低层次,用部分说明整体,用低层次说明高层次。在这种方法论指导下,400年来科学创造了一整套可操作的方法,取得巨大成功。

系统科学的早期发展在很大程度上使用的仍然是这种方法,不同的是强调为了把握整体而还原和分析,在整体性观点指导下进行还原和分析,通过整合有关部分的认识以获得整体的认识。对于比较简单的系统,这样处理一般还是有效的。但是,当现代科学把简单系统问题基本研究清楚,逐步向复杂系统问题进军时,仅仅靠分析—重构方法日益显得不够用了。把对部分的认识累加起来的方法,本质上不适宜描述整体涌现性。愈是复杂的系统,这种方法对于把握整体涌现性愈加无效。

系统科学是通过揭露和克服还原论的片面性和局限性而发展起来的。朴素整体论没有也不可能产生现代科学方法,但包含着还原论所缺乏的从整体上认识和处理问题的方法论思想。理论研究表明,随着科学越来越深入到更小尺度的微观层次,我们对物质系统的认识越来越精细,但对整体的认识反而越来越模糊。现代科学表明,许多宇宙奥秘来源于整体的涌现性。还原论无法揭示这类宇宙奥秘,因为真正的整体涌现性在整体被分解为部分时已不复存在。而社会实践越来越大型化、复杂化,特别是一系列全球问题的形成,也突出强调要从整体上认识和处理问题。

世界是演化的,一切系统都不是永恒的。宇宙的许多奥秘只有用生成的演化的观点,才能作出科学的说明。基于还原论的科学是存在的科学,无法研究演化现象。还原论就是既成论,还原方法就是分析方法。涌现论把世界看作生成的。从生成论的观点看,整体涌现性可以表述为“多源于少”,

“复杂生于简单”。生成论是涌现论表现形式之一。

总之,研究系统不要还原论不行,只要还原论也不行;不要整体论不行,只要整体论也不行。不还原到元素层次,不了解局部的精细结构,我们对系统整体的认识只能是直观的、猜测性的、笼统的,缺乏科学性。没有整体观点,我们对事物的认识只能是零碎的,只见树木,不见森林,不能从整体上把握事物、解决问题。科学的态度是把还原论和整体论结合起来。按钱学森的说法:“系统论是还原论和整体论的辩证统一”^[13]。

2.4.3 定性描述与定量描述相结合

任何系统都有定性特性和定量特性两方面,定性特性决定定量特性,定量特性表现定性特性。只有定性描述,对系统行为特性的把握难以深入准确。但定性描述是定量描述的基础,定性认识不正确,不论定量描述多么精确漂亮,都没有用,甚至会把认识引向歧途。定量描述是为定性描述服务的,借助定量描述能使定性描述深刻化、精确化。定性描述与定量描述相结合,是系统研究的基本方法论原则之一。

那些成功应用定量化方法的系统理论告诉人们,首先要对系统的定性特性有个基本的认识,然后才能正确地确定怎样用定量特性把它们表示出来。即使被公认为最定量化的学科,至少它的基本假设是定性思考的结果。要建立定量描述体系,关键之一是在获得正确的定性认识基础上如何选择基本变量。例如,普利高津经过长期观察思考非平衡态的物理系统,首先定性地理解了自然界的各种“活”结构或形态只能在系统远离平衡的条件下自发产生出来,而后进一步理解了这种大自然的创造性“必须以某种方式与距平衡态的距离联系起来”,把这种距离看作描述自然的一个新的基本参量^[14],最终找到定量地描述耗散结构形成演化的科学方法。

自牛顿(I. Newton)成功地用数学公式描述物体运动规律以来,定量化方法越来越受到重视,获得极大发展;定性方法被当作科学性较差的、在未找到定量方法之前的一种权宜方法。这在系统科学中(特别是早期)也有反映。但随着系统研究的对象越来越复杂,定量化描述的困难越来越严重了。系统科学要求重新评价定性方法,反对在系统研究中片面地追求精确化、数量化的呼声越来越强烈。就是说,那种不能反映对象真实特性的定量描述不是科学的描述,必须抛弃。

定量描述必须使用数学工具,定性描述也可以使用数学工具。由庞加莱(H. Poincaré)开创的定性数学是描述系统定性性质的强有力工具。特别

是研究系统演化问题,我们关心的是系统未来的可能走向,而不是具体的数值,动力学方程的定性理论、几何方法、拓扑方法等是适当的工具。

2.4.4 局部描述与整体描述相结合

整体是由局部构成的,整体统摄局部,局部支撑整体,局部行为受整体的约束、支配。描述系统包括描述整体和描述局部两方面,需要把两者很好地结合起来。在系统的整体观对照下建立对局部的描述,综合所有局部描述以建立关于系统整体的描述,是系统研究的基本方法。

突变论的创立者托姆认为,用动力学方法研究系统,既要从局部走向整体,又要从整体走向局部。对于从局部走向整体,数学中的解析性概念是有用的工具;对于从整体走向局部,数学中的奇点概念是有用的工具。一个奇点可以被看作由空间中的一个整体图形摧毁成的一点,系统在这种点附近的行为是了解系统整体行为的关键。所以,托姆认为:“在突变论中交替地使用上述两种方法,我们就有希望对复杂的整体情况作出动态的综合分析。”^[5]原则上说,一切动态系统理论都需要交替地使用从局部到整体和从整体到局部两种描述方法。

一种特殊而意义重大的局部描述与整体描述,是所谓微观描述和宏观描述。简单系统的元素同系统整体在尺度上的差别还构不成微观与宏观的差别,如机器系统的元件与整机一般都属于宏观对象。但巨系统出现了微观同宏观的划分,元素或基本子系统属于微观层次,系统整体属于宏观层次。系统的最小局部是它的微观组分,最基本的局部描述就是对系统微观组分的描述。任何系统,如果存在某种从微观描述过渡到宏观整体描述的方法,就标志着建立了该系统的基础理论。本书后面的论述表明,对于简单系统,它的元素的基本特性可以从自然科学的基础理论中找到描述方法,对元素特性的描述进行直接综合,即可得到关于系统整体的描述。对于简单巨系统,也具备从微观描述过渡到宏观描述的基本方法,即统计描述。复杂巨系统复杂到至今尚无有效的统计描述,也许并不存在这种描述方法,但局部描述与整体描述相结合的原则依然适用。

2.4.5 确定性描述与不确定性描述相结合

系统的不确定性有很多种类,如随机性、模糊性、信息不完全性、歧义性等。本书关于基础科学层次的内容只考虑随机不确定性,不涉及模糊性等不确定性。

从牛顿以来,科学逐步发展了两种并行的描述框架。一种是以牛顿力

学为代表的确定论描述,另一种是由统计力学和量子力学发展起来的概率论描述。在系统理论的早期发展中两种方法都有大量应用,但总体看是要么只使用确定论描述,要么只使用概率论描述,没有把两者沟通起来。采取确定论描述的有一般系统论、突变论和非线性动力学、微分动力系统等。香农信息论是完全建立在概率论描述框架上的典范。在控制理论、运筹学等学科中,两种描述都使用,但通过划分不同分支来分别使用它们,仍然没有实现沟通。自组织理论试图沟通两种描述体系,取得一定进展,但步伐迈得还不够大。现代科学的总体发展越来越要求把两种描述框架沟通起来,形成统一的新框架。系统科学的发展尤其需要把确定论框架同概率论框架沟通起来。混沌学等新学科的发展使人们初步看到希望。一种观点认为,如果把有限性作为认识自然的基本出发点,承认自然的有限性,我们就有可能从这两种描述体系根深蒂固的人为对立中解脱出来。

2.4.6 系统分析与系统综合相结合

要了解一个系统,首先要进行系统分析:一要弄清系统由那些组分构成;二要确定系统中的元素或组分是按照什么样的方式相互关联起来形成一个统一整体的;三要进行环境分析,明确系统所处的环境和功能对象,系统和环境如何互相影响,环境的特点和变化趋势。

如何由局部认识获得整体认识,是系统综合所要解决的问题。分析—重构方法用于系统研究,重点在于由部分重构整体。重构就是综合。首先是信息(认识)的综合,即如何综合对部分的认识以求得对整体的认识,或综合低层次的认识以求得对高层次的认识。综合的任务是把握系统的整体涌现性。从整体出发进行分析,根据对部分的数学描述直接建立关于整体的数学描述,是直接综合。简单系统就是可以进行直接综合的系统。简单巨系统由于规模太大,微观层次的随机性具有本质意义,直接综合方法无效,可行的办法是统计综合。复杂巨系统连统计综合也无能为力,需要更复杂的综合方法。本书对这几种情形都有专门的讨论。

2.5 模型方法

2.5.1 模型与原型

给对象实体以必要的简化,用适当的表现形式或规则把它的主要特征描绘出来,这样得到的模仿品称为模型,对象实体称为原型。模型也有结构,模型结构与原型结构是不同的两码事,但两者又有直接或间接的联系。

原型中必须考虑的结构问题都应在模型中有所反映,能以模型的语言描述出来。标度模型(scale model)要求具有与原型相同或相似的结构,但尺度大大缩小,如模型船舶、模型飞机等。地图模型(map model)要求具有与原型相同的拓扑结构。数学模型是抽象模型,不能要求它直接反映系统原型的结构,但必定与原型结构有内在联系,原型中的结构问题在模型中用数学语言描述,能用数学方法分析和解决。例如,原型的结构稳定与否可以转化为模型中数学结构的稳定与否。模型方法是系统科学的基本方法,研究系统一般都是研究它的模型,有些系统只能通过模型来研究。

构造模型是为了研究原型,客观性、有效性是对建模的首要要求,反映原型本质特性的一切信息必须在模型中表现出来,通过模型研究能够把握原型的主要特性。模型又是对原型的简化,应当压缩一切可以压缩的信息(标度模型表现为缩小规模),力求经济性好,便于操作。没有简化不成其为模型,同原型比较未能显著简化的模仿品不是好模型。

按照构造模型的成分,有实物模型和符号模型两种。系统科学的兴趣在于由纯信息而非实物构成的符号模型。符号模型又包括概念模型、逻辑模型和数学模型,它们都在系统科学中有所应用。但最重要的是数学模型,通常所谓研究系统的模型化方法,就是指为系统建立数学模型,通过分析模型来解决问题的一整套方法和程序。

按照模型的功能,有解释模型、预测模型和规范模型的划分。¹⁶模型的首要功能是提供一个框架,能够恰当地整理和组织观察数据、资料、信息,对原型系统的行为特性和运行演化规律作出解释,所以一般说来,模型首先是一种解释模型。基于系统的组分、结构、环境和现在的行为,能够对系统的未来行为特性作出预测的模型,是预测模型。预测模型也是解释模型,预测是特殊的解释。规范模型的功能在于提供按照一定目的影响和改变系统行为特性的思路 and 方式。

2.5.2 数学模型

所谓系统的数学模型,指的是描述元素之间、子系统之间、层次之间相互作用以及系统与环境相互作用的数学表达式。原则上讲,现代数学所提供的一切数学表达形式,包括几何图形、代数结构、拓扑结构、序结构、分析表达式等,均可以作为一定系统的数学模型。大量的数学模型是定量分析系统的工具。用数学形式表示的输出对输入的响应关系,就是广泛使用的一种定量分析模型。技术科学层次的系统理论和系统工程,都主要使用数

学模型作为定量分析工具,以便给出设计、操作系统所必须的定量结论。但数学模型同样可以作为定性描述系统的工具,对于描述系统演化现象来说,人们关心的主要是系统定性性质的改变与否,定性分析是更基本的。

定量描述系统的数学模型必须以正确认识系统的定性性质为前提。简化对象原型必须先做出某些假设,这些假设只能是定性分析的结果。描述系统的特征量的选择建立在建模者对系统行为特性的定性认识基础上。这是一切科学共同的方法论原则。系统科学讲的定性与定量相结合还有特别的含义。除了简单系统,都不能仅仅研究数学模型,不仅建立模型必须定性与定量相结合,还要大量使用半定性半定量的模型,甚至完全定性的模型。对于开放的复杂巨系统,如第9章所述,定性与定量相结合具有全新的意义。

一类用途广泛的定性模型是下列拓扑结构:

(1) 链结构 元素按照一定顺序排列成一个链条,首元同尾元不相连。

(2) 环结构 元素相互联结形成某种闭合环形,称为循环结构。最简单的是首元同尾元重合的闭链。由基本的循环结构可以构成更复杂的循环结构,以至于所谓超循环结构。

(3) 树结构 树是一种由根、干、枝、叶组成的形式系统,主要特点是有分叉,没有闭环。树中最简单的分枝是链结构。树结构在系统分析中有广泛应用,如决策树、语法树、演化树、家谱树等。

(4) 网络结构 同时可能包含链、环、树的复杂结构。

这类模型是描述系统结构的工具,它可以给出各个元素、子系统的相对位置、前后次序、分布情况等。例如,地图可以告诉人们,左边有河流,右边有山崖,但难以作出定量的描述,如崖有多深,河有多宽,在地图上一般来说找不到答案。

另一类模型是用有关的量来表达的,如函数、迭代、方程等。这种数学模型由两种量构成。一种是反映系统本身变化的量,如输入变量、输出变量、状态变量等,系统的行为、特性、未来发展趋势都可以通过它们来刻画。输入—输出方法的定量化表述,是给出输出变量对输入变量的响应关系的数学表达,通常是确定性响应函数。另一种是控制参量,它们一般反映系统与环境的依存制约关系,不能由系统本身获得,以输入量、输出量和状态量的尺度看,这些量可以当作不变量(给定量),因而在数学模型中以常数形式出现。如企业管理系统中,可以利用的资源、资金等是给定的,产品价格不

受企业的左右,这些量在企业系统的数学模型中只能作为控制参量出现。由状态变量和控制参量构成的某种数学方程式,称为状态方程(state equation),是最常用的数学模型。代数方程不含时间变量,用作静态系统的数学模型。动力学方程,主要是微分方程和差分方程,是动态系统的数学模型。状态方程的功能主要是描述系统状态转移的规律。

静态系统也须考虑控制参量变化带来的影响,但一般无需放在参量空间作整体的考察,通常的做法是引入灵敏度概念,分析参量的小扰动(称为参量摄动)给系统性能指标造成的影响,设法采取适当措施加以弥补。

2.5.3 基于计算机的模型

用计算机程序定义的模型,称为基于计算机的模型(computer-based model)。首先明确构成系统的“构件”,把它们之间的相互关联方式提炼成若干简单的行为规则,并以计算机程序表示出来,以便通过在计算机上的数值计算来模仿系统运行演化,观察如何通过对构件执行这些简单规则而涌现出系统的整体性质,预测系统的未来走向。所有数学模型都可以转化为基于计算机的模型,通过计算来研究系统。许多无法建立数学模型的系统,如复杂的物理过程,特别是生物、社会和行为过程,也可能建立基于计算机的模型。

用方程组之类数学表达式定义的传统模型,求解和处理往往需用复杂艰深的理论和技巧,费时费力,可行性常常较差,所得结果有时无法用实验检验。用计算机程序定义的模型,可以做到既严格,又可行,使我们能够在计算机上研究和预测系统,通过计算实验来检验结果。好的模型可以做到有可重复性。对于那些无法用真实的实验来检验的复杂系统,计算实验是唯一可用的实验检验手段。

计算实验是一种新兴的实验形式,有许多科学和哲学的问题尚未解决。但它为研究复杂巨系统提供了唯一普遍可用的实验手段,意义是重大的。

第3章 连续动态系统

从本章起,我们讨论可以用数学模型描述的系统。首先讨论以确定性模型描述的动态系统(亦称动力学系统),其中又分连续型与离散型两种,分别在第3、第4章讨论;第5章讨论以随机性模型描述的系统,其中也包括连续型与离散型两种。从系统建模的依据看,有两种数学模型,一种是根据基本科学原理建立的,一种是以唯象方法建立的。如何建立系统模型不仅需要系统科学知识,更需要对象系统所涉及的其他学科的知识,属于建模理论研究的课题。系统科学的讨论从已经有了系统模型开始。一个具体系统问题,能够按照哪一种模型描述,就采用相应的系统原理和方法去处理。

3.1 连续动态系统的数学描述

线性系统与非线性系统是基于系统的数学性质给出的系统分类,既适用于静态系统,也适用于动态系统。本书主要讨论动态系统。在系统科学中,迄今真正成熟的主要是线性系统理论。但系统科学重点研究非线性系统,是处理非线性问题的一种方法论。

3.1.1 线性动态系统

能够用线性数学模型描述的系统,称为线性系统。线性系统的基本特性,即输出响应特性、状态响应特性、状态转移特性,都满足叠加原理。令 f 代表某种数学操作,如关系、变换、运算、函数、泛函、方程等, x 记数学操作的对象(如变量), $f(x)$ 代表对 x 施加操作 f 的结果。如果 $f(x)$ 满足条件(k 为常数)

$$(1) \text{ 加和性 } f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2) \quad (3.1.1)$$

$$(2) \text{ 齐次性 } f(kx) = kf(x) \quad (3.1.2)$$

就称数学操作 f 为线性的。如线性关系,线性变换,线性运算,线性函数,线性泛函,线性方程,等等。将(3.1.1)与(3.1.2)合并表示为

$$f(ax_1 + bx_2) = af(x_1) + bf(x_2) \quad (3.1.3)$$

称为叠加原理, a 、 b 为常数。满足叠加原理是线性操作区别于非线性操作的基本标志。

连续动态系统的数学模型是微分方程,刻画系统的动态变量(状态变量的导数或高阶导数)对状态变量的依存关系以及状态变量之间的相互影响。如果状态变量只是时间的函数,与空间分布无关,称为集中参数系统,用常微分方程描述。状态变量同时依赖于时间和空间分布(同一时刻不同点的状态变量数值不同)的是分布参数系统,须用偏微分方程描述,鉴于它们过分复杂,本书将只限于讨论常微分方程描述的系统。

线性连续动态系统的数学模型为线性常微分方程,可以使用一元高阶方程,也可以使用多元一阶联立方程组。一般来说,这两种形式是等价的,可以互换。本书一般讨论以联立方程组描述的线性动态系统,其数学模型具有以下一般形式

$$\begin{aligned} x'_1 &= a_{11}x_{11} + \dots + a_{1n}x_n \\ &\vdots \\ x'_n &= a_{n1}x_{11} + \dots + a_{nn}x_n \end{aligned} \quad (x' = dx/dt) \quad (3.1.4)$$

系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1.5)$$

令

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (3.1.6)$$

记状态向量,动态方程(3.1.4)可表示为以下向量矩阵形式

$$X' = AX \quad (3.1.7)$$

如果系数矩阵 $A = (a_{ij})$ 不随时间而变化,即 a_{ij} 为常数,称为常系数方程。如果系数为时间 t 的函数 $a_{ij}(t)$,系数矩阵记为 $A(t)$,称为变系数方程。本书只讨论常系数方程。

数学模型(3.1.4)有两个基本来源。(1)许多系统的非线性因素微弱,允许忽略不计,近似满足线性假设(假设叠加原理成立),根据相关学科的基本原理直接建立线性方程(3.1.4)。(2)许多系统具有较强的非线性因素,线性假设不成立,根据基本原理只能建立非线性数学模型;但如果我们关心的主要是系统的局部性质(系统在某一点附近的行为),非线性模型又满足连续性和光滑性要求,就可以在该点附近把它线性化,得到线性模型(3.1.4),可用它来近似描述系统的局部行为。

模型方法隐含的一个假定是,只要动力学方程是合理的,我们就认为一

切有关系统行为特性的信息都包含于其中,即包含于方程的结构和系数(控制参量)中。对于线性系统,这些信息都包含在系数矩阵之中。最理想的处理方法是求方程的解析解,只要求得方程的解析解,是可以把握系统的全部行为特性。

线性系统存在通用的求解方法。例如,2维系统

$$\begin{aligned}x' &= a_{11}x + a_{12}y \\ y' &= a_{21}x + a_{22}y\end{aligned}\quad (3.1.8)$$

它的系数矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (3.1.9)$$

特征方程为

$$|A - \lambda I| = \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (3.1.10)$$

I 为单位矩阵。将(3.1.10)展开得

$$\lambda^2 - \tau\lambda + \mu = 0 \quad (3.1.11)$$

其中

$$\tau = a_{11} + a_{22} \quad (3.1.12)$$

$$\mu = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \quad (3.1.13)$$

是两个重要参数。解特征方程(3.1.11),得到两个特征根

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{\tau \pm \sqrt{\tau^2 - 4\mu}}{2} \quad (3.1.14)$$

一般情形下, $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 。任意给定初态

$$X_0 = C_1 V_1 + C_2 V_2 \quad (3.1.15)$$

V_1 和 V_2 是两个线性无关的特征向量,分别对应于 λ_1 和 λ_2 ,则通解为

$$X(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} v_1 + C_2 e^{\lambda_2 t} v_2 \quad (3.1.16)$$

分析这个解,即可把握系统的行为特性。

描述 n 维线性系统的微分方程组(3.1.4)的特征方程为

$$\lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0 = 0 \quad (3.1.17)$$

令 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 记 n 个特征根,则(3.1.4)的通解为

$$X(t) = \sum C_k e^{\lambda_k t} p_k(t) \quad (3.1.18)$$

C_k 是由初值决定的实常数, $p_k(t)$ 为多项式,由动力学方程和初态决定。

3.1.2 非线性动态系统

如果数学操作 f 不满足加和性和齐次性要求,则称 f 为非线性的。如非线性关系,非线性变换,非线性运算,非线性函数,非线性泛函,非线性方程,等等。线性函数关系本质上只有一种,即

$$y = ax \quad (3.1.19)$$

不同线性函数只是比例系数不同,经过平移和旋转等简单数学变换,可以完全重合。非线性函数关系有无穷多种定性性质不同的可能形态。仅就一元函数看,一般形式为

$$y = f(\lambda, x) \quad (3.1.20)$$

λ 为参量。 f 可能为各种抛物线函数,或各种指数函数,或各种三角函数等,不可能由一种或几种形式经过简单变换产生出来。非线性的这种特点是现实系统无限多样性、差异性和复杂性的主要根源。

非线性连续系统的动力学方程一般形式为以下方程组

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_m) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_m) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_m) \end{aligned} \quad (3.1.21)$$

$f_1, \dots, f_n$ 中至少应有一个为非线性函数。将控制参量表示为向量形式

$$C = (c_1, c_2, \dots, c_m) \quad (3.1.22)$$

称为控制向量。令 F 记

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (3.1.23)$$

则方程组(3.1.21)获得如下向量形式

$$\dot{X} = F(X, C) \quad (3.1.24)$$

方程组(3.1.11)是方程组(3.1.21)的特例,方程(3.1.14)则是方程(3.1.24)的特例。动力学方程是动力学的术语,在系统科学中,(3.1.11)、(3.1.14)、(3.1.21)和(3.1.24)通常称为系统的演化方程或发展方程。

按照演化方程对系统的分类,除已经提及的线性系统与非线性系统、集中参数系统与分布参数系统外,还有两种系统分类会经常提及:

(1) 自由系统与强迫系统

若演化方程只是状态变量的导数对状态变量的依赖关系,没有外作用项,称为自由系统。上面给出的都是自由系统。若演化方程中包含外来作用项 $\Psi(t)$ (或称强迫作用项、控制作用项),如以下方程描述的系统,称为

强迫系统:

$$\mathbf{X}' = F(\mathbf{X}, \mathbf{C}) + \Psi(t) \quad (3.1.25)$$

如果引入新的状态变量 $x_{n+1}(t)$, 令 $x'_{n+1} = \Psi(t)$, 强迫系统(3.1.25)可以转化为 $n+1$ 维自由系统来处理。因此, 本章主要讨论自由系统, 其结论原则上可以推广于强迫系统。

(2) 自治系统与非自治系统

演化方程中不明显包含时间 t 的是自治系统。演化方程中明显包含时间 t 的, 如下式所示, 是非自治系统

$$\mathbf{X}' = F(\mathbf{X}, \mathbf{C}, t) \quad (3.1.26)$$

非自治系统的特例之一是前述变系数系统, 特例之二是包含作为时间函数的强迫作用 $\Psi(t)$ 的系统(3.1.25)。如果把时间 t 作为新的状态变量 $x_{n+1} = t$ (动态方程中增加一项 $x'_{n+1} = 1$), 非自治系统(3.1.25) 和(3.1.26)可以变为自治系统(3.1.24), 但维数是 $n+1$ 。因此, 本书也不专门讨论非自治系统。

有了演化方程后, 一般有 3 种方法研究非线性系统的行为特性。

(1) 解析方法。据微分方程理论, (3.1.21) 在相当宽的条件下存在唯一解。由于非线性函数具有无穷多不可互换的形式, 反映非线性系统有无穷多种不同的定性性质, 一般地解析求解方程 (3.1.21) 描述的系统是不可能的。即使最简单的一维非线性系统

$$x' = f(x) \quad (3.1.27)$$

函数 $f(x)$ 仍有无穷多不同形式, 一般地解析求解也不可能。只有在某些特殊情形下可以获得解析解。例如, 当 $f(x)$ 具有适当形式时, 能用分离变量法获得解析解。

(2) 几何方法。几何方法主要用于分析系统的定性性质。避开解方程, 从方程的结构和参数中直接提取系统的定性信息, 有时十分方便有效, 当系统维数较低时可以借助直观图象获得对系统的深刻洞见。庞加莱开辟的微分方程定性理论及其后续发展为此提供了强有力的数学工具。

(3) 数值计算方法。利用演化方程定量研究非线性系统(3.1.21)普遍有效的方法是使用计算机进行数值计算, 求得方程的近似解。大型计算机允许人们根据数学方程对系统进行实验研究, 以获得关于非线性系统非平庸行为的某些直觉, 从而找到理论突破口。例如, 有关混沌动力学的几个重大发现, 都是通过计算机实验得到的。所以, 20 世纪 50 年代发明计算机成

为动力学历史上又一分水岭。

对于所谓弱非线性系统,按照“非线性是对线性的偏离”的观点,用线性化方法研究系统的局部行为特性,是非常有效的。设 $f(x)$ 在 x_0 处连续可微,按泰勒公式展开得

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + h(x) \quad (3.1.28)$$

$h(x)$ 为高次项,即非线性余项。只要 $x - x_0$ 足够小,非线性项可以忽略不计。将(3.1.28)代入(3.1.27),略去高次项 $h(x)$,得到非线性系统在 x_0 点附近的线性近似表达式

$$\begin{aligned} x' &= f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \\ &= ax + b \end{aligned} \quad (3.1.29)$$

其中, $a = f'(x_0)$, $b = f(x_0) - x_0 f'(x_0)$ 。由于满足连续光滑性要求,线性系统(3.1.29)可以足够精确地刻划非线性系统(3.1.27)的局部性质。

我们就 $n = 2$ 的情形讨论(3.1.21),即非线性系统

$$\begin{aligned} x_1' &= f_1(x_1, x_2) \\ x_2' &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (3.1.30)$$

不失一般性,设 f_1, f_2 在 (x_{10}, x_{20}) 附近连续可微,将(3.1.30)展开为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \text{高次项} \\ &= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \text{高次项} \end{aligned} \quad (3.1.31)$$

此处 $a_{11} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1}$, $a_{12} = \frac{\partial f_1}{\partial x_2}$, $a_{21} = \frac{\partial f_2}{\partial x_1}$, $a_{22} = \frac{\partial f_2}{\partial x_2}$ 。在 (x_{10}, x_{20}) 附近略去高次项,得到与(3.1.8)形式相同的线性方程组及其系数矩阵,可以作为描述非线性系统(3.1.30)的线性模型。

只要非线性系统在某一点附近满足连续性、光滑性要求,就可以在该点附近看作弱非线性系统,将演化方程展开,略去非线性项,化为线性模型,利用线性系统理论来分析模型,以期获得对非线性系统局部行为特性的近似描述。这种方法叫做非线性系统的局部线性化处理,有广泛的应用。如果单纯靠线性模型尚不能满足要求,还可以把非线性项作为扰动因素,对线性化分析结果加以修正。这叫做线性化加微扰方法,是线性科学对付非线性

的主要手段,可以对很大一类非线性系统得到足够满意的结论。

线性化加微扰仍属于线性系统理论的方法,不能用于处理具有间断点、不光滑点的非线性问题。并且线性化方法只适用于分析局部性质,不能用于大范围系统问题。系统方法的优势在于处理大范围的、全局的问题,线性化方法不能体现这种优点。线性化的实质是忽略非线性因素,而非线性因素正是系统产生多样性、奇异性和复杂性的根源,线性化所“化”掉的恰好是这种根源。为处理这类问题,非线性系统理论要求有全新的方法。

但是,线性系统理论仍然是系统科学中不可轻视的内容。这不仅由于目前真正成熟的、体系化了的内容主要仍是线性理论,还在于线性理论是非线性理论必要的基础性知识准备,线性理论的结论和方法对于解决非线性问题有重要应用。例如,构造非线性方程的解往往要利用线性方程的解,线性稳定性分析是研究非线性系统稳定性的基本技术之一,等等。此外,非线性问题的本质常常需要在与线性问题的比较中才能获得深入理解。

3.2 轨道、暂态、定态

确定性动态系统只要求出方程的解析解,从给定的初始条件出发,既可以预见系统的一切未来状态,也可以回溯过去的所有状态,达到对系统行为特性的全面而定量的把握。但非线性动力学方程能够获得解析解的情形极少。例如,天体力学表明,三体问题原则上已无法求得解析解,更不必提多体问题。求解析解不是处理非线性系统的普适方法。对于一般非线性系统,可行的方法是定性描述,即在状态空间和参量空间中用几何方法等定性手段来研究。从系统演化的角度看,重要的不是了解系统的定量性质,而是定性性质。所谓整体定性性质,就是部分组成系统整体时涌现出来的新性质。

3.2.1 状态空间与参量空间

由系统所有状态构成的集合,称为系统的状态空间,又称相空间(phase space)。空间的每个点称为状态点或相点。设系统有 n 个独立状态变量,记作 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。以状态变量为轴支撑起来的几何空间,就是系统的状态空间。状态变量的每一组具体数值 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 代表系统的一个具体状态或相。 n 是状态空间的维数(dimension),可以取任何正整数。1 维状态空间是直线或直线段,2 维状态空间是平面,称为状态(相)平面。3 维以下的状态空间可以画出来,4 维以上的属于抽象空间,无法直观表现。维数是决定系统行为特性的重要参数。在状态空间描述系统,由于能够区分不

同的维数,可以建立系统的演化方程,确定不同类型的状态,描述系统的状态转移规律。

演化方程(3.1.21)的每个解 $X(t)$ 代表状态空间的一个点集合,称为一条相轨道。状态在相空间沿轨道运动可以形象地比喻为物理空间的水流,一个解就是一个流(flow)。方程(3.1.21)有无穷多解,空间的轨道或流线亦无穷多。状态空间方法不是分别研究每个轨道,而是考察全部可能轨道及其分布,从而达到整体把握系统(3.1.21)的动态特性。

状态空间是在控制参量给定的条件下建立的。但控制参量也是可变的,这种变化有时只会引起系统行为特性的某些量变,有时可能导致系统定性性质的改变,因而是必须深入研究的重大问题。以控制参量 $c_1, c_2, \dots, c_m$ 为坐标轴构造的 m 维空间,称为参量空间(parameter space),又称控制空间(control space)。参量空间的每个点都对应一个确定的系统(3.1.21),所以,在参量空间研究的是演化方程结构相同的无穷多系统构成的系统族。

在状态空间和参量空间中描述系统,统称为状态空间方法。有时,还需要同时也在状态空间和参量空间中研究系统,即以全部状态变量和控制参量为轴支撑起来的高维空间,称为乘积空间。特别地,当只有一个状态变量 x 和一个控制参量 a 时,把系统放在乘积空间即 $x-a$ 平面上研究最为简便有效。

3.2.2 暂态与定态

由于状态空间包含系统的所有可能状态,有关系统动态特性的所有信息都蕴藏于其中,问题是如何提取这些信息。虽然状态空间有不可数无穷多个状态,但在系统学意义上可以划分为很少的几类,它们显示不同性质,代表系统的不同动力学行为特性。所以,在状态空间研究系统归结为划分不同类型的状态,描述各类状态的特征,确定不同类状态在空间的分布,阐明不同状态之间的联系,特别是如何从一个状态向另一个状态的转移规律。

动态系统有两类可能的状态。系统在某个时刻可能到达但不借助外力就不能保持或不能回归的状态或状态集,称为暂态(transient state)。系统到达后若无外部作用驱使将保持不变的状态或反复回归的状态集,称为定态(steady state)。定态是由状态空间中的点集合刻划的。最简单的定态只是空间的一个点。状态空间几乎全是由暂态点填充的,定态只是其中极其微小的一部分。图 3.2.1 是一个直观的例子,状态空间是曲线上所有点的集合,其中 A, B, C 三个点代表定态,其余无穷多点均代表暂态。把一个小球放

在 A 、 B 、 C 中任一点,只要没有外来扰动,小球始终停留在该点不动。把小球放在这三点之外的任何位置,只要没有外力支撑,小球将立即离开远去。

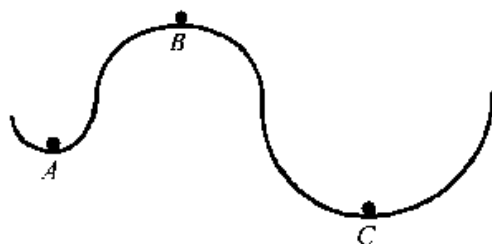


图 3.2.1

系统的定性性质是由定态决定的,不同的定态代表不同的定性性质,暂态只是系统为了确立某种定性性质所必须的量的积累,不能表现系统的本质特征。从一种定态到其他定态的变化反映的是系统从一种定性性质向另一种定性性质的转变,叫做系统的相变。系统演化理论主要是关于定态的理论。

动态系统有以下几类定态¹:

(1) 平衡态 最简单的一类定态是平衡态,在数学上由不动点(fixed point)来刻画。系统(3.1.21)的不动点指满足以下条件的状态点

$$x'_1 = x'_2 = \dots = x'_n = 0 \quad (3.2.1)$$

(3.2.1)称为系统(3.1.21)的不动点方程。在这种点上,所有状态变量的导数(变化率)都为0,状态不再发生变化,表明系统处于平衡运动。

(2) 周期态 设 $\varphi(t)$ 是演化方程(3.1.21)的一个解,满足条件

$$\varphi(t+T) = \varphi(t) \quad (3.2.2)$$

T 为某个常数,则称 $\varphi(t)$ 是方程(3.1.21)的一个以 T 为周期的周期解。周期解由相空间的一条闭曲线表示,代表系统的一条周期轨道,数学上称为极限环(limit cycle),特点是当 $t \rightarrow \infty$ 或 $t \rightarrow -\infty$ 时附近的相轨道以该闭曲线为极限。图 3.2.2 是 2 维空间的极限环,图 3.2.3 是 3 维空间的极限环。

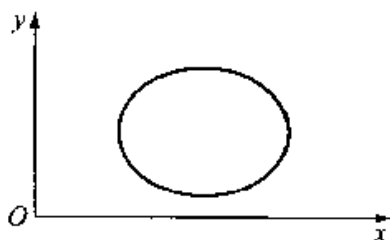


图 3.2.2 平面极限环

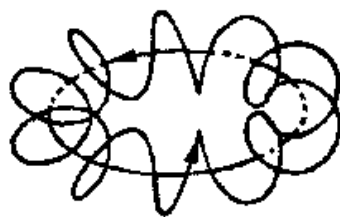


图 3.2.3 空间极限环

(3) 拟周期态 由多个不同周期且周期比为无理数的周期运动叠加在一起形成的复杂运动形式,称为拟周期运动,由3维或高维空间的环面(torus)描述。图3.2.4为一个2维环面,拟周期运动由环面上的一条非闭曲线表示。

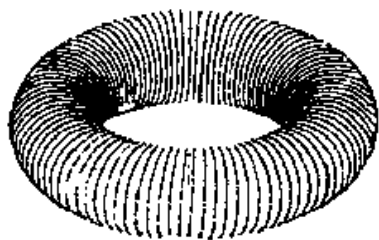


图 3.2.4 环面

(4) 混沌态(分形) 见3.8节。

定态与空间维数有密切关系。1维空间的状态只能在一條线上变换、转移,系统只有不动点表示的定态,即只有平衡运动一种行为方式。2维系统的状态可以在平面上转移,系统的动力学特性比1维系统丰富得多,不仅有不动点,可以作平衡运动,还可能有极限环,作周期运动。但2维空间仍不够宽阔。3维和高维空间给系统提供了充分的舞台,可以形成各种可能的定态,呈现出各种行为特性。可见,维数 n 是决定系统性质的重要参数。

3.2.3 初态与终态

以 t_0 记系统行为过程的起始时刻(一般取 $t_0 = 0$), t_0 时刻的系统状态称为系统的初始状态(初态, initial state),以向量形式表示为 $X_0 = X(t_0)$ 。确定性动力学假定初态的获得是扰动因素独立作用的结果,与系统自身的动力学规律无关。对系统的动力学考察归结为两点:一是在任意给定的初态扰动下看系统的行为特性;二是看系统动力学规律决定的系统行为特性。演化方程(3.1.24)的每个解 $X(t)$ 都代表系统的一个行为过程。轨道是初态和所有后续时刻 t 的状态 $X(t, X_0)$ 组成的集合,刻划的是系统在时间维中的状态转移过程。对于确定性系统,根据微分方程的存在-唯一性定理,从每个初态出发有且只有一条轨道。状态空间的每个点都可以作为初态,通过空间的每个点都有且只有一条相轨道,相空间充满轨道,不同轨道互不相交。一条轨道代表系统的一种可能行为过程,反映状态变量之间的相互依存关系,即状态转移规律。

充满相空间的无穷多条轨道由两大类组成。一类是由定态组成的轨

道。每种定态都是一条轨道,一个不动点是一条只包含一个点的特殊轨道,表示系统在那个状态上“呆着不动”。连续系统的一个极限环是一条包含无限多个状态的闭合轨道,表示系统沿着极限环作周期运动。混沌定态则代表系统的一个轨道丛。另一类轨道由暂态组成,称为暂态轨道。一旦系统在 t_0 时刻取得初态 $X_0 = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$,就会启动一个动态过程,系统沿着通过 X_0 的那条暂态轨道 $X(t, X_0)$ 运动。暂态轨道又分为两类:(1) 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $X(t, X_0)$ 存在有限极限,即以某条定态轨道为极限状态;(2) 当 $t \rightarrow -\infty$ 时 $X(t, X_0)$ 发散,不存在有限极限状态。暂态轨道 $X(t, X_0)$ 当 $t \rightarrow \infty$ 时系统的极限状态,即终了时刻 t_∞ 到达的状态 X_∞ ,称为系统的终态(final state)。我们研究动态系统,主要关注的是系统的终态。系统有无终态,终态的类型,各类终态的特性,如何向终态过渡,构成了动力学的终态问题。

3.3 稳定性

3.3.1 动态系统的稳定性问题

现实系统不可避免要承受来自环境或系统自身的各种扰动,扰动一般都会使系统的结构、状态、行为有所偏离,小扰动引起的是否为小偏离,出现偏离后系统能否恢复原样,就是稳定性研究要回答的基本问题。稳定性(stability)指的是系统的结构、状态、行为的恒定性,即系统结构、状态、行为的抗干扰能力。非形式地讲,如果小扰动引起的偏离也足够小,系统是稳定的。如果小扰动引起的偏离超出允许范围,甚至偏离不断增大,出现大范围的振荡,或向无穷发散,系统是不稳定的。

稳定性是系统的一种重要维生机制,稳定性愈好,系统的维生能力愈强。一个状态如果不稳定,必定是物理上不可实现(不可达)的,至多在某个动态过程中瞬间出现。一个系统的状态空间如果没有任何稳定定态,必定是物理上不可实现的,系统理论无需讨论它。从应用角度看,一个不稳定的系统无法正常运行,无法实现其功能目标,因而是没有用的。人们总是力求采用足够稳定的系统。但若从演化角度看,如果一个系统的所有状态在所有条件下都是稳定的,它就没有变化、发展、创新的可能。只有原来的状态、结构、行为模式在一定条件下失去稳定性,系统才可能向新的结构、状态、行为模式演化,即系统有发展创新的可能。所以,不稳定性在系统演化理论中具有非常积极的、建设性的作用。但稳定是发展的前提。新状态、新结构、新模式如果不稳定,没有能力保存自己,它也不可能取代旧状态、旧结构、旧

模式。新系统只有具备稳定性机制,才能保持刚刚建立起来的结构和特性,保存已积累的信息,避免昙花一现。

稳定性问题是动态系统理论的首要问题。什么是稳定性,如何判别稳定性,稳定性的类型,系统的稳定性程度(稳定裕度),系统是否存在不稳定点,稳定的系统在什么条件下会失去稳定性,如何确定系统的失稳点,系统在失稳点附近行为特性的分析,如何从失稳的原状态向稳定的新状态过渡,等等,回答这些问题形成了稳定性理论,是系统学的重要内容之一。组分关联方式的稳定与否一般难以直接用数学方法描述,行为的描述可以归结为状态描述,状态的稳定与否可以用数学方法描述。因此,动态系统理论的稳定性研究总是围绕状态以及由状态构成的轨道这两个概念进行的。状态或轨道是否稳定,能够间接表征系统的组分关联方式和整体行为模式是否稳定,只要对状态或轨道的稳定与否做出判断,便无需再对系统结构或行为模式的稳定性问题进行研究。

3.3.2 稳定性的数学定义

严格地说,讨论单个状态的稳定性没有意义,需要研究的是轨道或系统演化方程解的稳定性。不动点虽然只是一个点,但它代表一条特定的轨道,即演化方程的一个解,存在稳定性问题。据统计,科学文献上出现的稳定性定义有 50 多种,通常采用的是李雅普诺夫(A. M. Liapunov)定义。

3.3.2.1 李雅普诺夫意义下的稳定性

(1) 令 $\Phi(t)$ 是向量微分方程(3.1.24)的一个解, $X(t)$ 为任何初态扰动 $X_0 = X(t_0)$ 引起的解。如果对于每个足够小的 $\epsilon > 0$, 总有 $\delta(\epsilon) > 0$, 使得只要在 $t = t_0$ 时满足

$$|X_0 - \Phi(t_0)| < \delta \quad (3.3.1)$$

就有

$$|X(t) - \Phi(t)| < \epsilon \quad (3.3.2)$$

对所有 $t \geq t_0$ 成立,则称解 $\Phi(t)$ 是李雅普诺夫稳定的。否则,称 $\Phi(t)$ 为李雅普诺夫不稳定的。

(2) 设方程(3.1.24)的解 $X = \Phi(t)$ 是李雅普诺夫稳定的,并且

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |X(t) - \Phi(t)| = 0 \quad (3.3.3)$$

则称 $\Phi(t)$ 是李雅普诺夫意义下渐近稳定的(asymptotically stable)。

定义(1)表示只要初态的偏离小于 δ , 两个解的偏离永远小于 ϵ 。稳定性要求并不意味着系统在受到扰动后没有变化,而是要求只要初态扰动足

够小(满足(3.3.1)),所引起解的偏离也足够小(满足(3.3.2))。小扰动只能引起小偏离,这样的系统有能力保存自己并发挥功能。图 3.3.1 示意了李雅普诺夫稳定性。

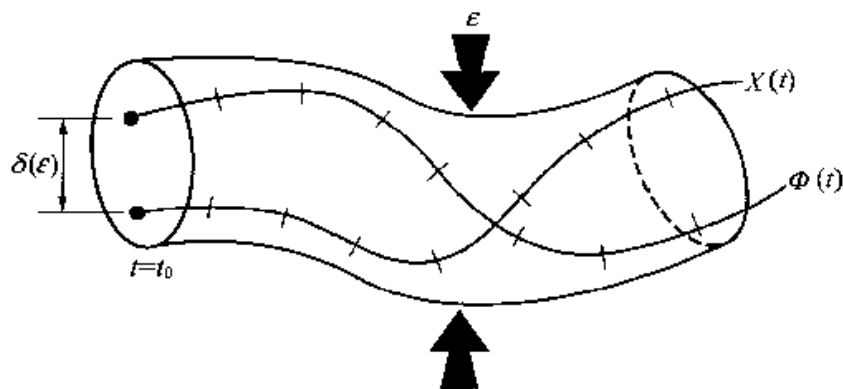


图 3.3.1

李雅普诺夫稳定只要求把解的偏离限制于一定范围,不要求最终消除偏离。与之相比,李雅普诺夫渐近稳定是对稳定性更严格的要求。(3.3.3)表示随着系统走向终态,解的偏离将消失,回到扰动前的状态。中学物理讲的随意平衡是李雅普诺夫稳定的例子,存在磨擦、黏滞等现象的阻尼运动是李雅普诺夫渐近稳定的例子。图 3.2.1 中的 A 和 C 是两个渐近稳定的定态, B 为不稳定定态。

李雅普诺夫稳定性要求太严格,它限定两个解 $\Phi(t)$ 和 $X(t)$ 在 t 的同一时刻必须相互接近。为放松这个限制,使定义能够包含一类重要的稳定性,介绍以下概念。

3.3.2.2 庞加莱意义下的稳定性

(1) 令 Γ 为动力学方程解 $\Phi(t)$ 对所有 t 定义的轨道, Γ' 为解 $X(t)$ 对所有 t 定义的轨道。如果对于任 $\epsilon > 0$, 存在 $\delta(\epsilon) > 0$, 使得只要

$$|\Phi(t) - X(\tau)| < \delta(\epsilon) \quad (3.3.4)$$

对某个 τ 成立, 就存在某个 $t(t')$ 使得

$$|\Phi(t) - X(t')| < \epsilon \quad (3.3.5)$$

对所有 $t > 0$ 成立, 则称 Γ 是轨道稳定的 (orbitally stable)。

(2) 如果当 $t \rightarrow \infty$ 时 Γ' 趋向于 Γ , 就称轨道 Γ 是渐近稳定的。

轨道稳定性的涵义是, 两个解“经历相同的历史, 但时间尺度可能不同”, 两者的时间对应关系为 $t(t')$ 。如图 3.3.2 所示, 两条轨道有不同的瞬

时时间密度。

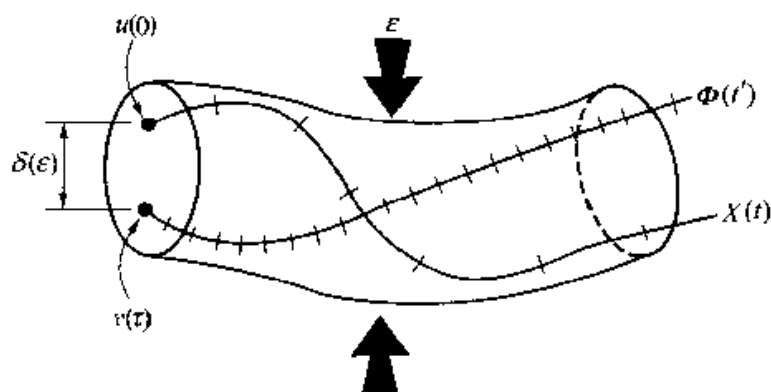


图 3.3.2

以上定义的稳定性属于系统的局部性质,只对一定范围内的初态偏离成立,称为局部稳定性。有时需要取消这个限制,研究在任何初态扰动下的系统行为,称为大范围稳定性,这里不作讨论。

3.3.3 定态的稳定性

从相空间看,一个定态的稳定性问题也就是它附近轨道的稳定性问题。所以,轨道的稳定性主要指的是定态的稳定性。由于把稳定性界定为系统行为在受到扰动后能否消除偏离的问题,一个定态是否稳定可以通过它周围的所有轨道的终态走向来判别。首先考察不动点的稳定性。我们就 2 维系统来讨论。数学分析判定,存在 4 种类型的不动点,其中两类又分为稳定的与不稳定的两种。为简化计,不动点都放在坐标原点。

(1) 焦点(focus)型不动点 特点是周围布满螺旋形的相轨道,从附近任一初态开始的轨道都是以不动点为极限点的螺旋线。又分稳定与不稳定两种情形。图 3.3.3 为稳定焦点,左图为相轨道,螺旋式地向不动点收缩。右图为状态变量 $x_2(t)$ 在时间域上的行为,随着 $t \rightarrow \infty$ 振荡式地衰减为 0。图 3.3.4 为不稳定焦点,左图为相轨道,轨道螺旋式地远离不动点而去,右图为 $x_1(t)$ 在时间域上的行为,随着 $t \rightarrow \infty$ 振荡式地向无穷发散。

(2) 结点(node)型不动点 特点是周围布满非螺旋形轨道。在正规情形下,相轨道是指向不动点的直线。又分稳定与不稳定两种情形。图 3.3.5 为稳定结点,左边为相图,从任何初态开始,系统都沿着一条直线轨道无限趋向不动点。右边为 $x_1(t)$ 的时间域行为,单调地趋向于结点。图 3.3.6 为不稳定结点,左边为相图,右边为时间域行为。

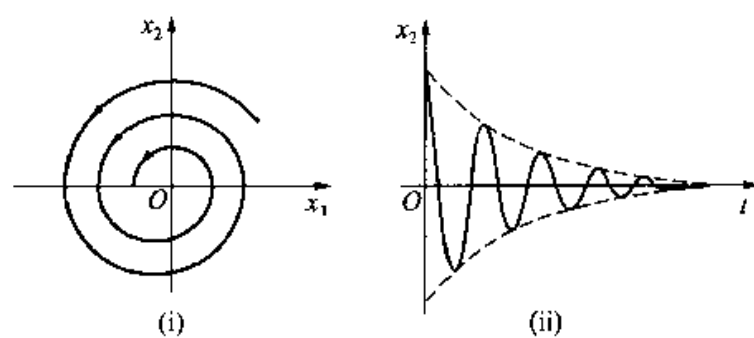


图 3.3.3

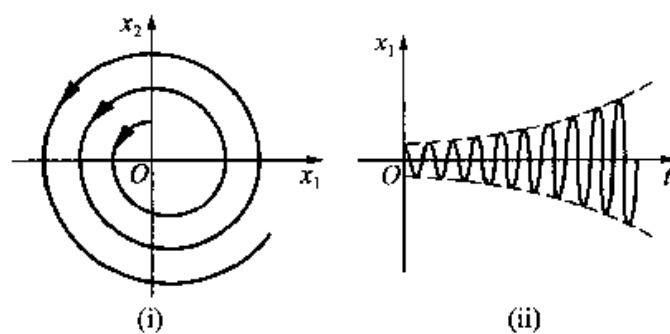


图 3.3.4

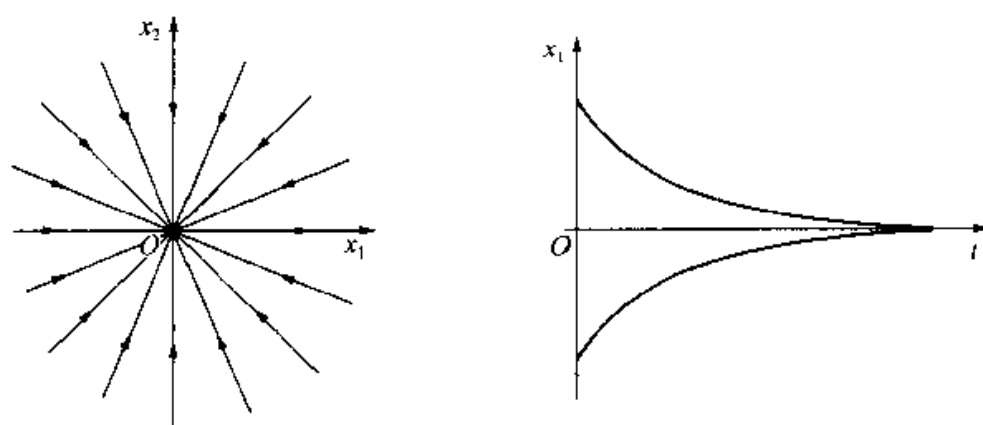


图 3.3.5

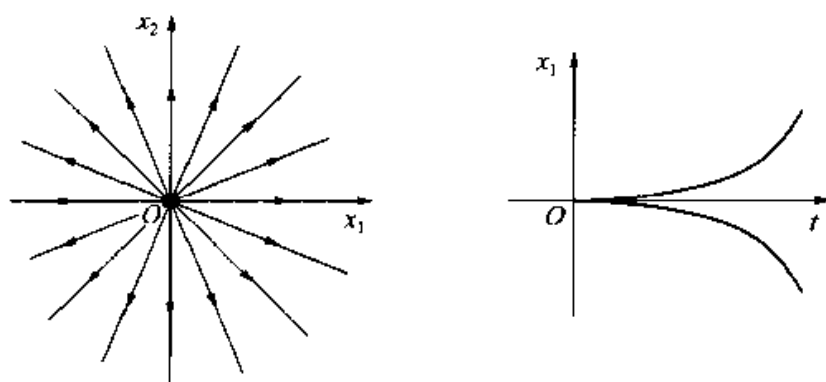


图 3.3.6

图 3.3.7 为非正规稳定结点,其中右图为相轨道,1、2 在时间域上的对应图象,都是非单调曲线,但只有半次振荡。

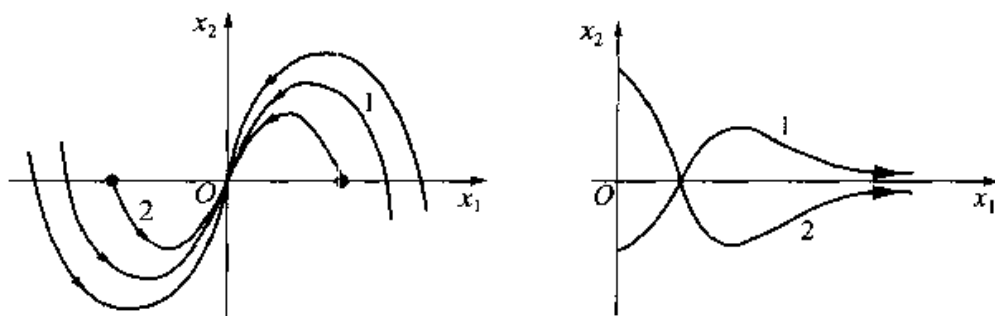


图 3.3.7

(3) 中心点(center)型不动点 特点是不动点周围布满周期不同的闭合轨道,以邻域内任何点为初态,系统都将出现围绕不动点的周期运动。这种平衡态对扰动不敏感,只要初态偏离足够小,周期轨道对中心的偏离也足够小。故中心点是稳定的,但不是渐近稳定的。如图 3.3.8 所示。

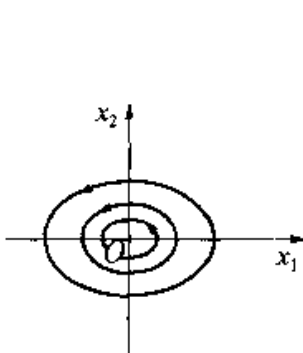


图 3.3.8

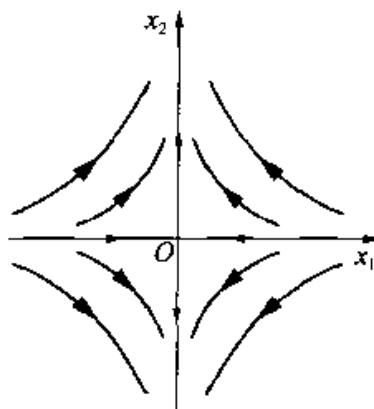


图 3.3.9

(4) 鞍点(saddle)型不动点 特点是两条相轨道从相反方向向不动点收敛,两条相轨道从不动点沿相反方向向外发散。这四条相轨道对刻画鞍点的特性非常重要,经过适当坐标变换,可以将它们分别置于两个坐标轴上,如图 3.3.9 所示。相平面被分为四部分,每条相轨道都先向鞍点逼近,后又远离鞍点而去,故鞍点在整体上是不稳定的。

极限环或周期轨道的稳定性,可分为 3 种情形。稳定的极限环的特点是附近一切轨道都螺旋式地收敛于极限环,即所有环外的轨道都向内卷去,所有环内的轨道都向外卷去,如图 3.3.10 所示。不稳定极限环的特点是一

切轨道都螺旋式地向远离极限环的方向发散,即所有环外的轨道都向外卷去,所有环内的轨道都向内卷去,如图 3.3.11 所示。第三种是单侧稳定的极限环,或者外部的轨道收敛于极限环而内部的轨道远离极限环,如图 3.3.12 左边所示;或者外部轨道发散而内部轨道收敛于极限环,如图 3.3.12 右边所示。

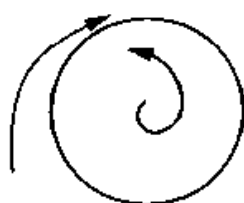


图 3.3.10

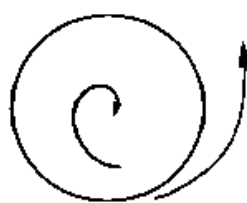


图 3.3.11

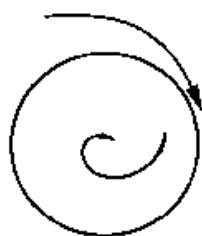


图 3.3.12

暂态轨道的稳定性问题可以归结为定态轨道的稳定性问题,一个定态轨道的稳定性判定后,它周围的暂态轨道的稳定性就确定了。中心点是平衡运动,周围的暂态轨道是周期运动,有定性性质的区别,但都是李雅普诺夫稳定而非渐近稳定的。鞍点附近虽有两条稳定轨道,由于所有其他轨道都不稳定,总体上属于不稳定定态。

3.3.4 线性系统的稳定性

由于线性系统演化方程存在一般解法,可以直接分析方程解来确定系统稳定与否,以及对稳定性的定量刻画。考虑一个最简单的系统,由以下单变量方程描述

$$\dot{x} = ax \quad (3.3.8)$$

通解为

$$x(t) = ce^{at} \quad (3.3.9)$$

c 是由初态确定的积分常数。设初态为 x_0 , 则特解为

$$x(t) = x_0 e^{at} \quad (3.3.10)$$

a 为特征指数,它的正负将决定两种完全不同的系统行为,如图 3.3.13 所

示。 $a > 0$ 时 $x(t)$ 向无穷发散, 系统不稳定。 $a < 0$ 时 $x(t)$ 收敛于平衡态 $x = 0$, 系统稳定。特征指数 a 的大小表示方程解收敛或发散的速度, 是系统稳定性的数量指标。

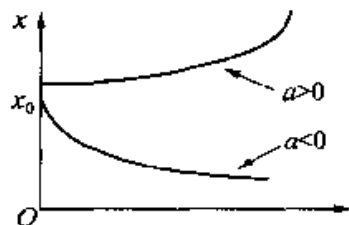


图 3.3.13

依据特征值来判别系统稳定性的方法对线性系统普遍适用。动力学系统(3.1.21)的特征根 λ_k 一般为复数 $\lambda_k = R_k + iI_k$, R 为实部, I 为虚部。上例是虚部 $I = 0$ 的特殊情形。就(3.1.18)看, 由于指数函数比多项式有更强的收敛和发散能力, 稳定性主要由特征根的实部 R 决定, $P_k(t)$ 项无关大局。具体判别方法如下:

(1) 如果所有特征根 λ 的实部都是负数, 系统是渐近稳定的;

(2) 至少有一个 λ 的实部为正数时, 系统是不稳定的;

(3) 所有 λ 的实部均为非正数、但至少一个为 0 时, 系统可能稳定, 也可能不稳定, 称为临界情形, 需有更精致的判据。

3.3.5 非线性系统的稳定性

与线性系统不同, 非线性系统由某个解的稳定与否一般不能断定其他解的稳定与否。看以下 1 维系统

$$x' = \sin x \quad (3.3.11)$$

不动点方程为

$$\sin x = 0 \quad (3.3.12)$$

对任意整数 k , 一切 $x = k\pi$ 的点都是不动点。1 维相空间为 x 轴。在 $x - x'$ 平面上画出函数关系 $x' = \sin x$, 可以直观地表示出流线在相空间的变化方向, 从而确定不动点的稳定性。如图 3.3.14 所示, $x' > 0$ 时流线箭头指向右边, $x' < 0$ 时流线箭头指向左边。因此, 凡 $x = 2k\pi$ 时为不稳定不动点, 以空心点表示, 初始扰动引起的流线都远离该点; 凡 $x = (2k + 1)\pi$ 时为稳定不动点, 以实心点表示, 初始扰动引起的流线都收敛于该点。同一系统(3.3.11)既有稳定定态, 又有不稳定定态。所以, 非线性系统只能讨论某个

解的稳定与否,不能一般地讨论系统的稳定与否。

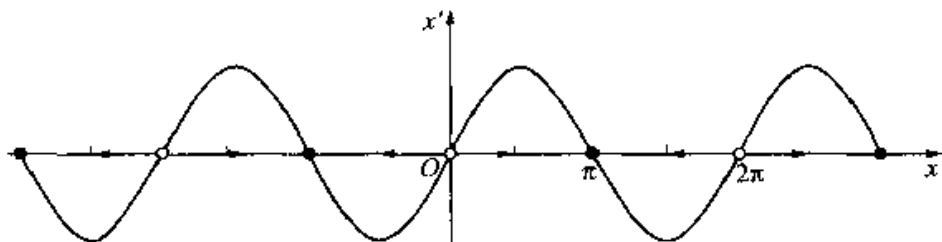


图 3.3.14

上述研究稳定性的几何方法难以应用于一般情形。当考察的是局部稳定性时,如果系统演化方程满足连续光滑性要求,通用的处理方法是在给定点的附近把方程组(3.1.21)展开,略去高次项,得到一个同维的线性方程组,关于这个线性系统的稳定性的结论,也就是非线性系统局部稳定性的结论。这种方法称为非线性系统的线性稳定性分析,也称为李雅普诺夫第一方法,在系统科学中有广泛的应用。

考察 1 维系统(3.1.27), $x' = f(x)$ 。设 x_e 为不动点,即 $x'_e = f(x_e) = 0$ 。在 x_e 处给 $x(t)$ 以小改变量 $u(t)$

$$u(t) = x(t) - x_e \quad (3.3.13)$$

两边微分得

$$u' = x' = f(x_e + u) \quad (3.3.14)$$

求泰勒展开式,略去非线性高次项,得到线性方程

$$u' = au \quad (3.3.15)$$

其中 $a = f'(x_e)$ 。(3.3.15)的解为

$$u(t) = u(0)e^{at} \quad (3.3.16)$$

$u(t)$ 的稳定性因 a 的取值不同而分两种情形:

- (1) $a < 0, t \rightarrow \infty, e^{at} \rightarrow 0, u(t) \rightarrow 0, x(t) \rightarrow x_e$, 稳定;
- (2) $a > 0, t \rightarrow \infty, e^{at} \rightarrow \infty, u(t) \rightarrow \infty, x(t) \rightarrow \infty$, 不稳定。

上述关于稳定性的结论都是定性的。实际问题常常需要对稳定性有某种定量的度量,如系统衰减到某个稳定态的速度。线性稳定性分析有助于解决这个问题。对于 1 维非线性系统的一般形式(3.1.27),上面的分析表示,决定其稳定性的是导数 $a = f'(x_e)$, a 的正负号决定解是发散还是收敛,数值大小表示发散或收敛的速率,数值 $1/|f'(x_e)|$ 可以作为不动点稳定性的测度,称为系统的特征时间尺度。

稳定性的判别是动态系统理论的重要问题之一。一个动力学方程只要正确反映系统的运动规律,方程本身必然包含有关判别稳定性的足够信息。问题是如何提取这种信息。求出方程的解以研究稳定性,是一种提取信息的方式。另一种方式是不解方程,直接根据方程的结构和参数提取有关系统稳定性的信息,称为直接方法。最著名的是李雅普诺夫直接方法,思路是根据方程的结构和参数,构造一个函数 $V(x)$,把定义中关于李雅普诺夫稳定和李雅普诺夫渐近稳定的基本要求转变为对函数 $V(x)$ 的要求,判明 $V(x)$ 是否满足这些要求,即可以判断系统是否稳定。下面仅就自治系统 (3.1.21) 进行讨论。

首先定义几个概念。设 $V(X)$ 是定义在闭域

$$\Omega: |X| \leq h \quad (h \geq 0) \quad (3.3.17)$$

上的连续函数。如果

$$V(X) \geq 0 \quad (\leq 0), \quad X \neq 0 \quad (3.3.18)$$

$$V(X) = 0, \quad X = 0 \quad (3.3.19)$$

则称 $V(X)$ 是域 Ω 上的非负(非正)函数;如果

$$V(X) > 0 \quad (< 0), \quad X \neq 0 \quad (3.3.20)$$

$$V(X) = 0, \quad X = 0 \quad (3.3.21)$$

则称 $V(X)$ 是域 Ω 上的正定(负定)函数。于是有

【李雅普诺夫稳定性准则】对于系统 (3.1.21), 如果存在连续可微正定函数 $V(X)$, 使得

(1) 函数 $V(X)$ 沿着轨道的全导数是非正的, 即

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f_i \leq 0 \quad (3.3.22)$$

则系统的零解是稳定的;

(2) 函数 $V(X)$ 沿着轨道的全导数是负定的, 即

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f_i < 0 \quad (3.3.23)$$

$V(X)$ 的全导数作为 x 的函数是非正的, 则系统的零解是李雅普诺夫渐近稳定的。

$V(X)$ 称为李雅普诺夫函数。应用李雅普诺夫直接方法的关键是构造 $V(X)$ 。目前尚不存在构造 $V(X)$ 的一般方法。进一步的讨论请参看有关专著, 这里只讨论以下例子。

【例 3.3.1】 设系统的演化方程为

$$\begin{aligned}x_1' &= x_2 - x_1 \\x_2' &= -x_1\end{aligned}\quad (3.3.24)$$

这是一个线性系统,坐标原点即平衡点。取

$$V(X) = x_1^2 + x_2^2 \quad (3.3.25)$$

不难验证这是一个可微正定函数,全导数为

$$\frac{dV}{dt} = 2x_1(x_2 - x_1) + 2x_2(-x_1) = -2x_1^2 \quad (3.3.26)$$

是非正定函数,系统为零解稳定的。

李雅普诺夫方法给出的是稳定性的充分条件,不满足其条件的解不一定是稳定的,需用别的方法判别。但有逆定理:若系统是渐近稳定的,一定存在 $V(x)$ 为李雅普诺夫函数。

3.4 吸引子与目的性

3.4.1 吸引子

非形式地说,相空间中满足以下 3 个条件的点集合(可能包含一个点或有限个点或无限多个点),称为动态系统的吸引子(attractor)。

(1) 终极性 吸引子代表系统演化行为要达到的终极状态,处于非吸引子态的系统“不安于现状”,力求离之远去,处于吸引子态的系统“安于现状”,不再具有力图改变这种状态的动力。

(2) 稳定性 吸引子态是系统自身质的规定性的体现,具有抵制干扰、保持自身特性的能力,即具有稳定性。

(3) 吸引性 作为吸引子态的状态集合对于周围的其他状态或轨道具有吸引性,只要系统尚未到达吸引子态,现实状态与吸引子态之间必定存在非零的、指向吸引子的牵引力,牵引着系统向吸引子态运动。

由于(1),吸引子只能是定态,一切暂态点均被排除在外。由于(2),吸引子只能是稳定定态,一切不稳定的焦点、结点、极限环和环面都不可能成为吸引子,鞍点也不可能成为吸引子。由于(3),稳定而无吸引性的定态被排除于吸引子的候选行列,如具有李雅普诺夫稳定性的中心点不是吸引子。具有吸引性是目的态的根本要素,没有吸引性的状态不能成为系统演化所追求的目标。

乍看起来,稳定性与吸引性是一致的。这是一种假象,不仅存在满足李

雅普诺夫稳定性要求但没有吸引性的定态,也存在有吸引性而不满足李雅普诺夫稳定性要求的定态。例如,以下系统

$$\vartheta' = 1 - \cos\vartheta \quad (3.4.1)$$

$\vartheta_e = 0$ 为不动点,对 $t \rightarrow \infty$ 时的所有轨道都有吸引力,但不是李雅普诺夫稳定的;存在这样的轨道,它们从无限接近 ϑ_e 点开始,但要经历很长的旅程才能回到 ϑ_e ,如图 3.4.1 左图所示,右图在 ϑ 轴(相空间)上标明流线的走向。这表明,稳定性与吸引性是相互独立的,互不包含。

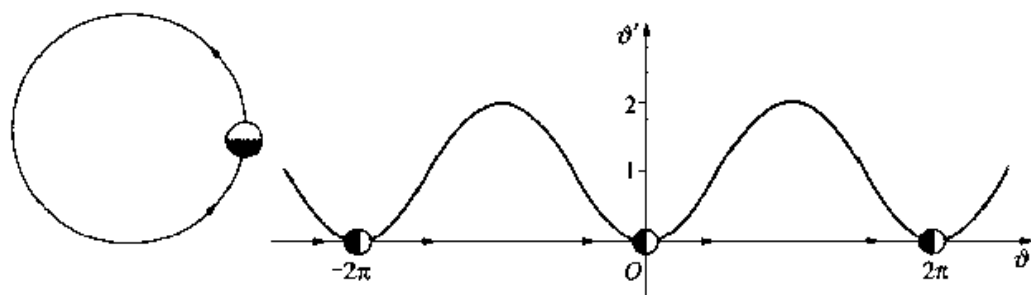


图 3.4.1

常见的吸引子有以下几类:

- (1) 焦点和结点,代表系统的平衡运动;
- (2) 极限环,代表系统的周期运动;
- (3) 环面,代表拟周期运动;
- (4) 奇怪吸引子(strange attractor),代表系统的混沌运动;

(5) 混沌边缘(edge of chaos),代表介于有序(前三类)和混沌之间的运动体制。

描述生命系统、社会系统和机器系统离不开目的概念。非线性动力学发现,目的性并不神秘,它不过是系统的一种动力学特性,可以用吸引子来描述。托姆提出吸引子概念就是为了描述系统的目的性。广义地说,凡存在吸引子的系统,均为有目的的系统;凡有目的的系统,也是存在吸引子的系统。从暂态向稳定定态的运动过程,就是系统寻找目的的过程。如钱学森所说:“所谓目的,就是在给定的环境中,系统只有在目的点或目的环上才是稳定的,离开了就不稳定,系统自己要拖到点或环上才能罢休。”²耗散系统都可能吸引子。一切存在吸引子的系统,在演化过程中均表现出这种“不达目的不罢休”的行为特征。系统的目的态不是单纯由系统自身决定的,还同环境紧密相关。每个稳定定态都是系统与环境相互作用而达成的

均衡状态,环境改变了,原有的均衡打破了,系统就要相应地调整目的态,以求与环境达成新的平衡。

3.4.2 吸引域

每个吸引子在相空间都在自己的周围划分出一定的“势力范围”,凡是以那个范围内的点为初态而开始的轨道都趋向于该吸引子。相空间中这样的点集合,称为吸引子的吸引域(domain of attraction)。粗略地说,相空间的吸引子和吸引域的关系类似于真实空间的江、湖与它们的流域的关系,流域内的雨水总是流向域内的江、湖,可以形象地示意为图 3.4.2。

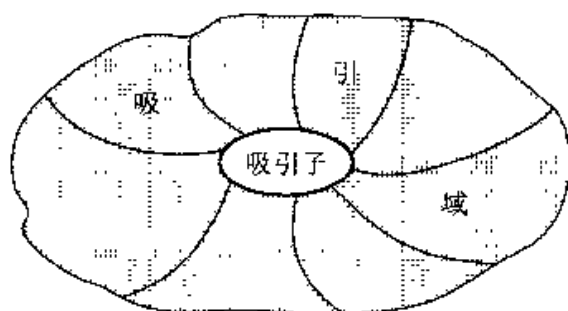


图 3.4.2

相空间还存在一类特殊的点或点集合,它们对于周围的任何轨道都是排斥的,从附近任何点开始的轨道随着时间的展开将离开该点或点集合而远去,因而称为排斥子(repeller)。不稳定焦点,不稳定结点,不稳定极限环,不稳定环面,都是排斥子。但鞍点和半稳定的极限环不是排斥子。

显然,图 3.2.1 中的不动点 A 和 C 是该系统的吸引了, B 是排斥子。在图 3.3.14 中, $x = (2k+1)\pi$ 均为系统(3.3.11)的吸引子, $x = 2k\pi$ 点均为系统的排斥子。

至此,我们可以引入系统指标(index)的概念。特征值 $\lambda = R + iI$ 实部 R 的符号有重要的动力学意义。实部为正的的特征值的数目,称为系统的指标。一般地讲,指标为 0 的定态是吸引子,指标为 n (系统维数)的定态是排斥子,指标介于 0 和 n 之间的定态是鞍点。可见,存在指标从 1 到 $n-1$ 的各种鞍点,彼此有性质上的差异。2 维系统施展不开,3 维系统可以充分显示出来,如图 3.4.3 所示。

排斥子又称为源(source),吸引子又称为汇(sink)。一切有意义的相轨道都是从源流向汇。

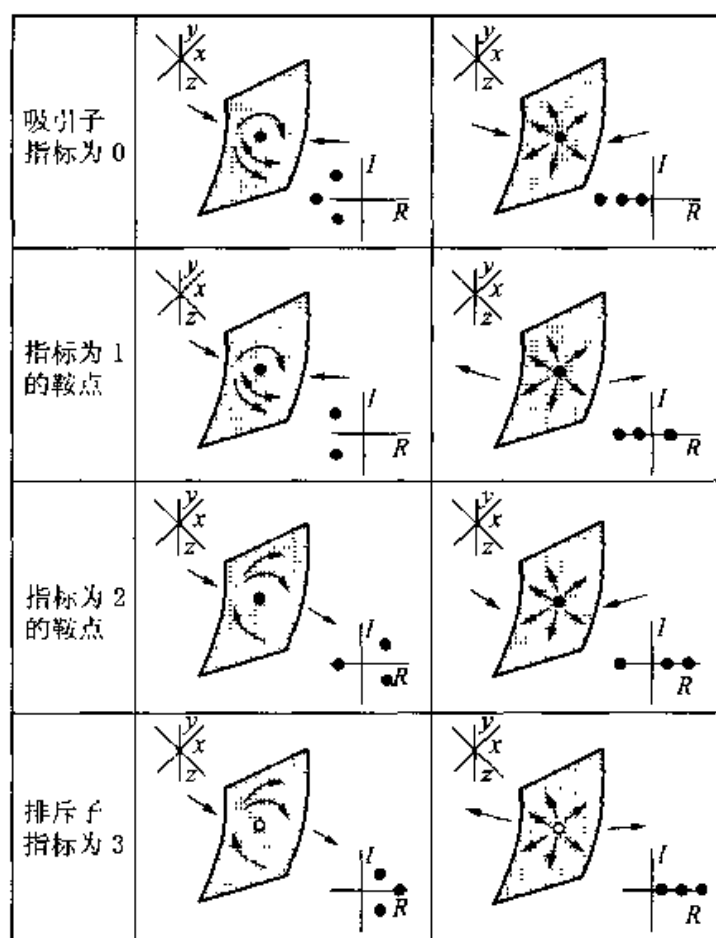


图 3.4.3

3.4.3 系统的相图

在状态空间用定性方法研究系统,目标不在于刻划每一条具体轨道,而在于刻划一切可能轨道的集合,弄清轨道的类型和分布,做到整体地把握动态系统的运动规律和特性。为达到此目的,特别是对于不超过 3 维的系统,相图是一个得力工具。取定控制参量的一组数值,在相空间用几何图形直观地表示出系统所有可能的定态,标明定态的类型、个数、分布以及每个定态周围的轨道特性和走向,这种图形称为系统的相图(phase portrait)。

线性系统只可能有不动点型定态,不可能有极限环或环面或其他更复杂的定态,但各种类型的不动点都可能出现。线性系统至多可能有一个吸引子。当存在吸引子时,线性系统的整个相空间都是它的吸引域,吸引子刻划了系统在整个相空间的行为特征。只有一个吸引子,表示系统只有一种可能前途,没有不同前途的相互竞争,没有选择的余地。

非线性系统的相图要比线性系统的相图丰富复杂得多。在非线性的系统中,各种不动点都可能出现。在简单而非常广泛的情形下,通过局部线性化处理,可以按照线性模型确定非线性系统的不动点。如果演化方程的展开式中没有线性项,即线性化方法无效,需使用更精致的方法确定不动点。

非线性系统相图中可能出现业已发现的各种定态,如平面极限环和各种空间极限环(空间的维数不同,但极限环都是1维的),各种高维环面,各种奇怪吸引子,各种混沌边缘。尤其重要的是,非线性系统常常是多个定态并存。相空间可以同时存在几个不动点,有同类的,也有不同类的,有稳定的,也有不稳定的。可以同时存在不动点和极限环,或同时存在不同的极限环,还可能同时存在有序吸引子和奇怪吸引子,同时存在不同的奇怪吸引子。原则上讲,定态的各种不同组合都可能在非线性系统中出现。

多个吸引子并存,必然把整个相空间划分为不同的吸引域。确定吸引域的分界线是一个重要问题。对于规则的吸引子,分界线一般也是规则的曲线或曲面。对于奇怪吸引子,分界线或分界面是复杂的分形结构。

图3.4.4给出一个包含多个定态的2维非线性系统的相图。 A 为稳定焦点, B 为鞍点, C 为不稳定结点, D 为稳定极限环。需要特别注意的是由鞍点 B 引出的轨道,称为鞍沿,起分界线的作用,可以类比于地球表面的分水岭。在此图中,鞍沿与极限环一起把相平面划分为5个流域。确定了不动点、极限环和鞍沿,整个相平面的结构就清楚了。

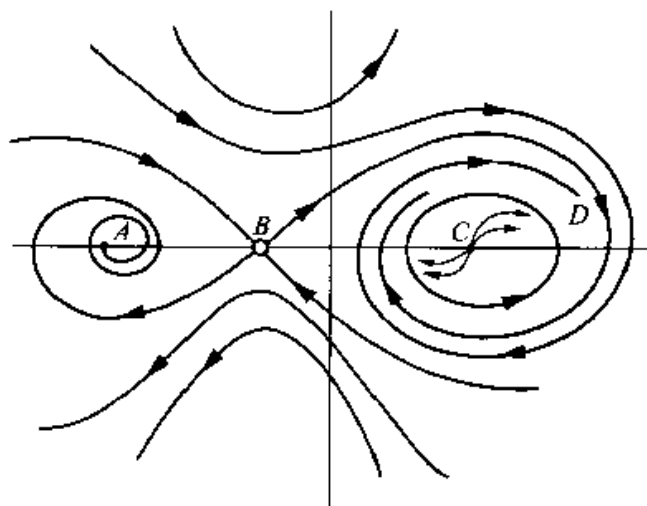


图 3.4.4

图3.4.5给出另一包含多个定态的2维非线性系统的相图。 D 为稳定

的极限环, A 、 C 为鞍点, B 为不稳定焦点。因此, 此系统只有一个吸引子, 代表周期运动。

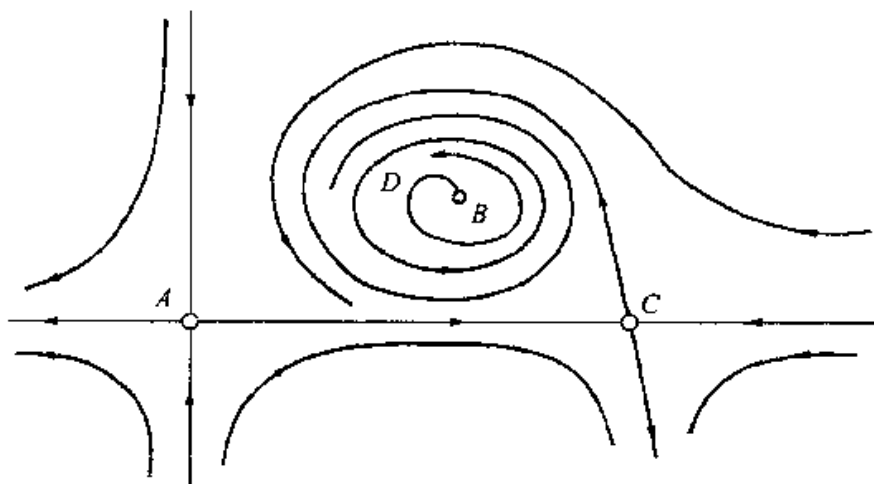


图 3.4.5

同一系统中并存的不同吸引子之间存在竞争关系。初态落在哪个吸引域, 系统就以那个吸引子为目的态而运行演化。多吸引子并存使系统演化具有多种可能前途, 需要进行选择。这对于阐述系统演化问题极为有效。

对于一般非线性系统, 线性化方法只能提供不动点附近的轨道信息, 不能了解大范围的轨道特性。要获得非线性系统大范围的相图信息, 需应用指标理论。指标理论给出的是一种拓扑方法, 能够提供有关相图的全局信息。就 2 维系统看, 指标理论可以回答这样一些问题: 是否一条闭轨道必定包含一个不动点, 如何确定相平面上某个指定部分不可能有闭轨道, 高阶不动点附近的轨道有何特点, 哪类不动点会在分岔时消失, 等等。

建立系统演化方程后, 可以用数学手段回答下列问题: 系统有无吸引子, 有多少吸引子, 有哪些类型的吸引子, 吸引子在相空间如何分布, 如何划分吸引域, 有无排斥子, 排斥子的特性和分布如何, 关于这些问题的—般结论, 构成所谓吸引子理论。它指明动态系统可能具有的稳定性态和功能行为, 是系统理论的另一重要内容。

3.5 周期运动与回归性

3.5.1 非线性系统的自激振荡

在物理现象、化学现象、生命现象、社会现象和心理现象中, 经常可以发现系统状态在不断作时起时伏、或升或降的运动, 这种现象称为振荡, 振荡

的特征称为振型。一种简单而常见的情形是有固定周期的振荡,称为周期运动。周期运动是非线性动态系统的基本行为模式之一,在理论和实际上均有重要意义。

根据周期运动的成因,可以把它分为两种。系统在周期性的外部作用(强迫作用)下出现的周期运动,称为他激振荡。在没有外部周期作用驱动时,如果系统由于自身内部因素而出现周期运动,称为自激振荡(振荡的频率和振幅均由系统自身的结构和参数决定)。产生自激振荡的根源是系统内部的非线性相互作用。把非线性系统线性化,必然把系统产生振荡的内在根源“化掉”,导致在有关系统定性行为的判断上出现错误。所以,应用线性化方法处理非线性系统问题时要格外注意。

并非所有非线性系统都会出现自激振荡。在数学上,自激振荡的根源是存在极限环。如果极限环是稳定的,对应的周期运动也是稳定的,即可以自我维持,称为自持振荡;如果极限环不稳定,对应的周期运动也不稳定,即不能自我维持,称为非自持振荡。

作为例子,讨论在非线性动力学发展史上起过重大作用的范德波尔方程(van der Pol equation)

$$x'' + \mu(x^2 - 1)x' + x = 0 \quad (3.5.1)$$

此处参量 $\mu \geq 0$, $\mu(x^2 - 1)x'$ 为非线性阻尼项。这一项的作用,当 $|x| > 1$ 时类似于正阻尼,当 $|x| < 1$ 时类似于负阻尼。 $x_e \equiv 0$ 为不稳定焦点。 $\mu > 0$ 时,系统存在一个稳定的极限环,如图 3.5.1 左边所示,一条非圆的闭轨道;右图为时间域上的行为,一种非正弦波的周期运动。因此,这个方程描述的

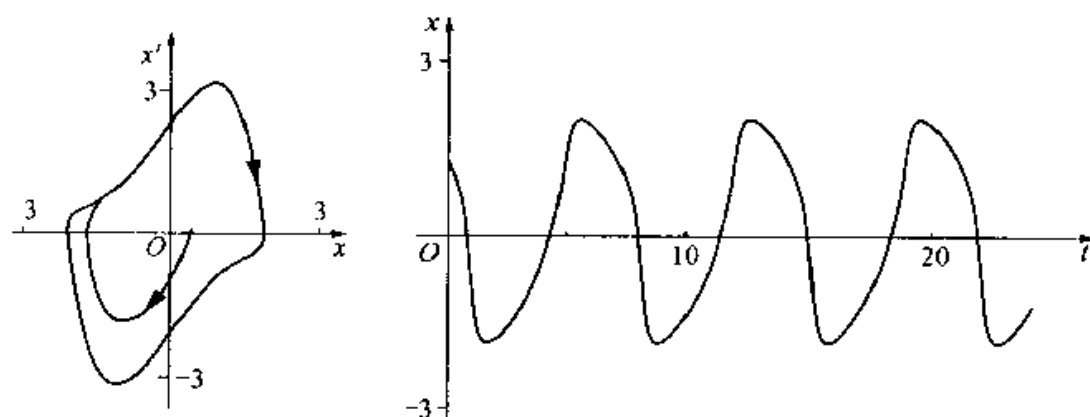


图 3.5.1

系统可以出现稳定的自激振荡。

研究表明,在适当外作用下,受迫范德波尔方程(振子)可能出现分频现象,即次谐波运动。当给定适当的控制参量时,相空间同时存在不同的周期吸引子,因起动条件不同,系统可能出现不同的次谐波运动。

3.5.2 极限环分析

极限环是相空间的闭合轨道。所以,1维系统不可能存在极限环,没有振荡行为;2维以上的系统可能存在极限环,可以出现振荡行为。给定系统的演化方程,判别系统是否存在极限环,分析极限环(定性的与定量的)性质,就是极限环分析。

首先应区分极限环与中心点附近的闭合运动轨道。极限环是孤立的闭轨道,它的周围都是螺旋式向外展开或向内卷缩的非闭轨道,在其邻域内不存在其他闭轨道。中心点本身为非闭轨道,但在其邻域内存在无穷多条同类的闭轨道,它们不是孤立的,振幅由初值决定。设 $x(t)$ 是线性系统的一个周期解,对于任一实数 $c \neq 0$, $cx(t)$ 也是一个周期解,表明 $x(t)$ 为大量单参数的闭轨道所包围。中心点周围的闭轨道既不相互吸引,也不相互排斥;极限环对周围的轨道要么吸引,要么排斥(在复杂情形下,可能对某些方面吸引,对某些方面排斥)。极限环是一类定态,代表系统的一种行为模式或运动体制;中心点附近的闭轨道是系统的扰动态,不代表系统的运动体制。极限环是当 $t \rightarrow +\infty$ 或 $t \rightarrow -\infty$ 时系统所趋达的一种终态,中心点附近的闭轨道不代表系统的终态。

判别系统是否存在极限环,包括正问题和反问题两方面。正问题是,对于一个给定的系统,如何排除它存在闭轨道。以下3种方法可以在一定范围内解决这个问题。

(1) 梯度系统无闭轨道。给定非线性系统 $x' = f(x)$, 如果存在一个单值标量函数 $V(x)$, 使得

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -f(x) \quad (3.5.2)$$

则称该系统为一个具有势函数 $V(x)$ 的梯度系统 (gradient system)。有定理保证: 梯度系统不可能存在极限环。只要判明系统为梯度型的, 即可肯定它不会发生自激振荡。

(2) 如果系统 $x' = f(x)$ 为非梯度型的, 但在不动点 x_0 附近可以构造一个李雅普诺夫函数(沿轨道减少的类能量函数), 有定理保证不动点 x_0 是渐

近稳定的。这意味着系统没有闭轨道。

(3) 迪拉克判据(Dulac criteria)。排除系统存在闭轨道的第三种方法以著名的格林定理(Green's theorem)为依据,称为迪拉克判据。设系统 $x' = f(x)$ 是定义在单连通的平面区域 R 上的连续可微向量场,如果存在一个连续可微的实值函数 $g(x)$,使得 $\nabla(gx')$ 在 R 内具有单一符号,则有定理保证,在整个区域 R 内没有闭轨道。

反问题是:给定系统 $x' = f(x)$,如何确定它具有闭轨道。回答这个问题的是动态系统理论的下述著名定理。

庞加莱-本迪克松定理(Poincaré-Bendixson theorem) 给定系统 $x' = f(x)$,设

- (1) R 为平面上的一个有限闭区域;
- (2) $f(x)$ 在包含于 R 内的某个开集上连续可微;
- (3) R 不包含任何不动点;
- (4) 存在轨道 C ,只要从 R 内某一点开始,将永远保持在 R 内部;

那么,轨道 C 要么是闭合的,要么当 $t \rightarrow \infty$ 时螺旋式地趋向于某条闭轨道。

如图 3.5.2 所示,由于任何闭轨道都包含不动点,定理涉及的区域 R 必定是环形的。

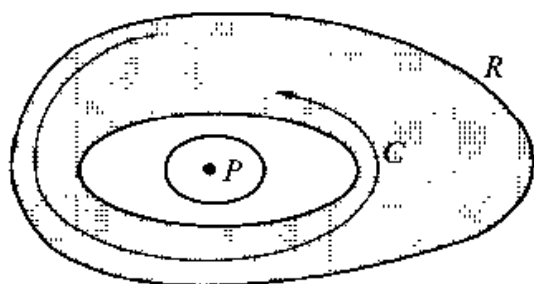


图 3.5.2

3.5.3 他激振荡

前面讨论的都是自由系统,动力学问题基本上可归结为初态问题,即系统如何响应初态扰动及其最终走向。对于存在外部作用的强迫系统(3.1.25),还必须讨论系统如何响应强迫作用项及其最终走向。特别地,这里讨论系统在外力作用下的周期运动,即他激振荡。

线性系统当且仅当从外部施加周期作用项时才能出现稳定的周期运动。例如,阻尼强迫线性振子

$$x'' + 3.2x' + 256x = 256\sin t \quad (3.5.3)$$

在右端为零输入时只有平衡运动 $x(t) \equiv 0$ 。在正弦输入作用下,系统的状态响应为具有相同频率的正弦波,如图 3.5.3 所示。上图为物理模型,一个有钉状末端的钢条,由一个带正弦交流电的电磁铁作小幅度的驱动。理论分析发现它具有一个稳定的极限环,系统的稳态行为是与输入频率相同的正弦波,如下图所示,两个初态造成的差别只表现于过渡过程。

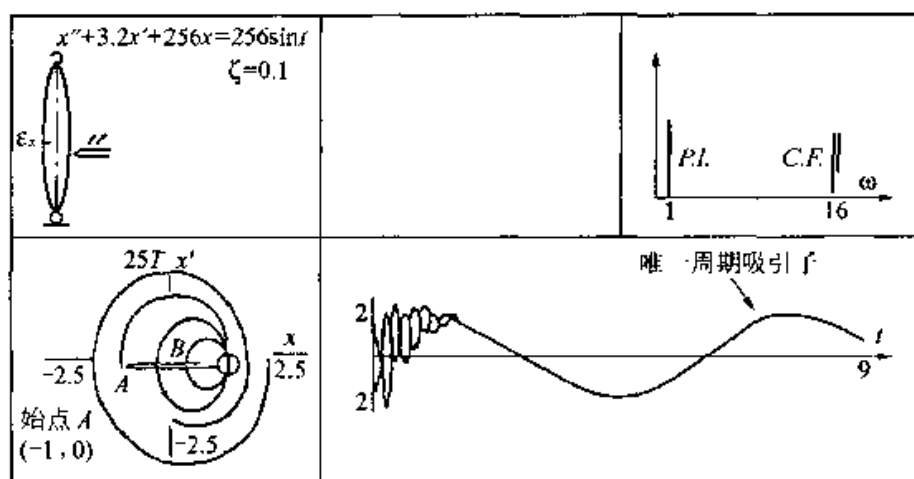


图 3.5.3

非线性强迫系统的情形要复杂许多。系统行为由自身的动力学特性和强迫作用项共同决定。考察动力学发展史上另一个著名例子

$$x'' + ax' + x^3 = b\cos t \quad (3.5.4)$$

称为达芬方程(Duffing equation)。在右端为 0(自由系统)时,系统只有平衡态,不会发生自激振荡。讨论以下特殊情形

$$x'' + 0.08x' + x^3 = 0.2\cos t \quad (3.5.5)$$

这个系统的相空间有 5 个周期吸引子并存,把相空间分为 5 个吸引域,相互竞争,视初态的不同而可能出现 5 种不同的周期运动。如图 3.5.4 所示。

范德波尔方程(3.5.1)比达芬方程要复杂。不仅可能出现多吸引子共存和竞争,还可能发生分频现象。设强迫作用的频率为 ω ,由于系统的内在非线性相互作用,状态响应可能出现二分频 $\omega/2$,三分频 $\omega/3$,以至 n 分频 ω/n (n 为正整数)。分频代表系统出现次谐波运动,是非线性造成的一种奇异行为,可能导致混沌运动。

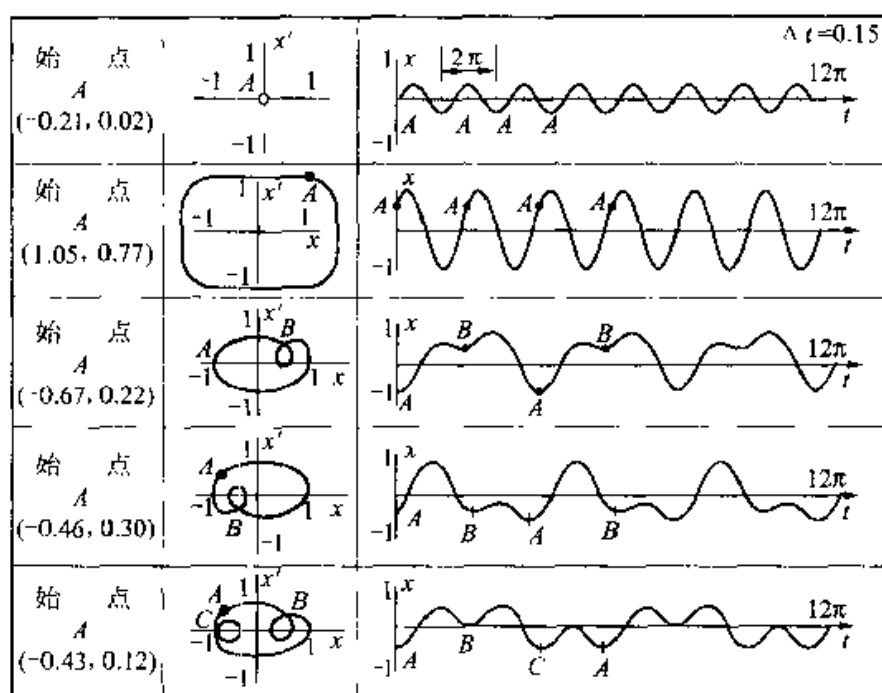


图 3.5.4

3.5.4 回归性与非游荡集

人们总是希望根据以往的事件预见未来,预见未来的前提是系统行为具有回归性(回复性)。静止的平衡态具有最平庸的回归性:不动也是回归。周期运动具有最典型的回归性,轨道上的每个状态经过确定的周期后必定严格地再次出现,只要没有外部扰动,每个状态都会无数次地重复出现。在一般情形下,回归性不要求严格地回到原有状态,也不要求按确定的周期回归,只要在 $t \rightarrow \infty$ 过程中能够反复回到其任意近的地方。回归的方式可以是规则的,也可以是不规则的。有限次的回归后逃逸掉的状态还不算具有回归性的状态,在 $t \rightarrow \infty$ 的过程中无限次地回归的状态,才是可回归的。

系统的演化方程或其描述的动力学规律,不妨记作 φ ,可以视作以相空间的点(系统的可能状态)为对象的操作变换,把 φ 施加于初态 $x_0(t=t_0)$,在 $t \rightarrow \infty$ 过程中可以得到从 x_0 出发的那条轨道 $\varphi(x_0, t_0, t)$ 上的所有点;把 φ 施加于不同的初态,可以得到相空间的所有点。这样,相空间的点可以分为两类:在变换 φ 作用下具有回归性的相点称为非游荡的(nonwandering),在有限次回归后逃逸掉的相点称为游荡的(wandering)。设 C 为相空间的一个点集, $\varphi(C)$ 记对 C 中所有点施加变换 φ 后得到的点集。可以定义如下概念:令 V_x 记相点 x 的一个邻域,若存在实数 $\tau > 0$,当时间 $t > \tau$ 时, $\varphi(x)$

的邻域与 V_x 不相交,即

$$\varphi(V_x) \cap V_x = \emptyset \text{ (空集)} \quad (3.5.6)$$

则称 x 为 φ 的一个游荡点;若相点 x 不是游荡点,则称 x 为 φ 的非游荡点。相空间中所有非游荡点的集合,记作 Ω ,称为 φ 的非游荡集。

动态系统理论阐明,系统的全局特性基本取决于它的非游荡集及其附近的轨道特性。动态系统是否存在非游荡集 Ω , Ω 集的构成和特点,如何用非游荡集描述系统的回归性,也是动态系统理论的重要内容。

3.6 分岔

前面都是在给定控制参量条件下在相空间研究系统的状态转移,本节将转向在参量空间中研究系统的行为特性如何随着控制参量的改变而变化。

3.6.1 结构稳定性

状态空间是在给定控制参量的前提下建立的,在状态空间中研究的是给定控制参量的特定系统。控制参量的不同取值代表不同的系统,形成一个包含无限多个不同系统的系统族。控制参量变化的影响需在参量空间中考察。在参量空间研究的是具有相同数学结构的演化方程描述的系统族,而不是单个系统,更不是系统的某条轨道。控制参量的变化不改变系统演化方程的数学结构,但可能改变系统的动力学特性,包括定性性质的改变,即系统相图结构(注意,不是2.1节讲的系统结构)的改变。这种变化包括:定态的产生(从无到有)和消失(从有到无),稳定性的改变(从稳定定态变为不稳定定态,或者相反),定态的类型、个数及其在相空间分布的改变,等等。

给定参量空间的一点,即给定一个系统及其相图结构,改变控制参量(可以看作对控制参量的扰动),考察它所引起的系统相图变化。如果系统相图只有量的变化,即控制参量的小扰动不会引起系统相图定性特征的变化,就说系统是结构稳定的(structure stable);如果控制参量的小扰动引起系统相图发生定性性质的改变,就说系统是结构不稳定的。

请注意:第一,应区分运动稳定与结构稳定,运动稳定是在状态空间中研究系统的概念,反映的是系统的运动或行为具有稳定性;结构稳定是在参量空间研究系统的概念,反映的是系统动力学规律的稳定性。第二,结构稳定性不是指系统组分之间关联方式的稳定性,而是指系统相图结构的稳定性。但两者有内在联系,如果系统在参量空间表现出相图的稳定性,系统组

分之间的关联方式即结构也是稳定的;反之,如果相图结构发生定性性质变化,组分之间关联方式必定出现定性性质的变化。结构稳定性也是作为参量空间的局部特性来定义的,所以,某些判别方法与运动稳定性相同。

一个处处结构不稳定的系统没有现实存在的可能性,系统理论无需研究它。一个处处结构稳定的系统不可能演化,同样无研究的必要。现实存在的系统在参量空间中几乎处处都是结构稳定的,因而才有存在和发展的可能,但必定在某些特殊点或点集合上出现稳定性的丧失,控制参量的微小变化将引起系统定性性质的改变。这是系统演化理论研究的问题。在参量空间中,出现结构不稳定的位置是由演化方程规定的,如果在尽可能相近条件下重复做实验,就可以在近似相同的位置出现结构不稳定现象,可以预期得到同样类型的结果。因此,“结构不稳定性是以一种结构稳定的方式出现的”³。这就为研究结构不稳定性问题提供了客观可能性。

3.6.2 分岔

在参量空间中,控制参量改变引起动态系统定性性质的改变,称为分岔(bifurcation)。下图所示为一承载重物的钢条,重力 G (控制参量)较小时钢条垂直如左图,代表系统的一个稳定定态。逐步增大 G 到 $G = G_c$ 时,垂直位置失稳,钢条突然弯曲,出现两个可能的稳定位置,中图为向左弯,右图为向右弯。状态变量即钢条中点对垂直位置的偏离记作 x , $x = 0$ 代表垂直状态, $x = +k$ 和 $x = -k$ 代表两个新的稳定状态。这就是一种分岔现象。参量空间中发生分岔的点,本例中为 $G = G_c$,称为分岔点。

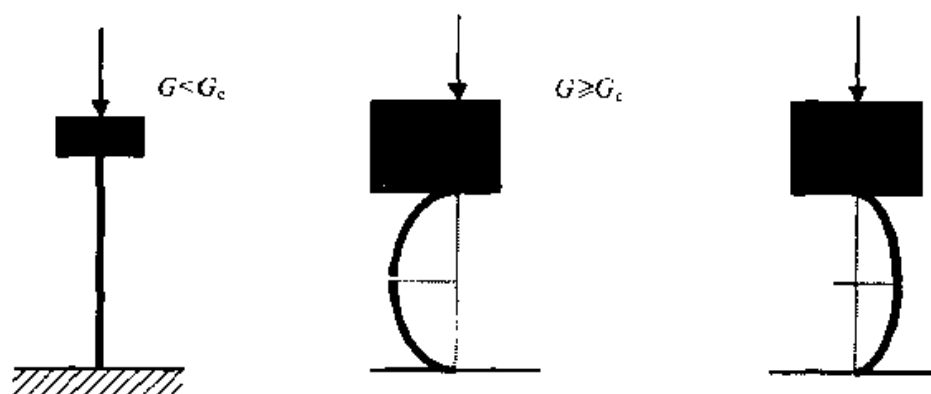


图 3.6.1

所谓定性性质的改变,包括:

- (1) 定态的创生(从无到有)或消失(从有到无)。

(2) 稳定性的改变,原本稳定的定态失去稳定性,或原本不稳定的定态变为稳定的。例如,系统(3.6.4)就是这种情形。

(3) 原稳定定态失稳,出现一个或几个新的稳定定态,但新旧定态属于同一类型。例如,图3.6.1所示为有势系统,分岔意味着势函数发生结构性改变,分岔前的势函数 $V(x)$ 如图3.6.2左图所示,分岔后 $V(x)$ 如图3.6.2右图所示。

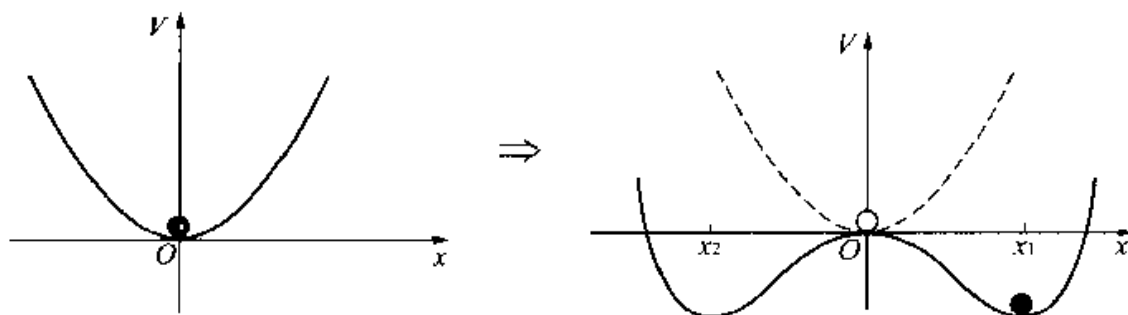


图 3.6.2

(4) 从一类定态经分岔出现不同类型的定态。

(5) 相空间中定态分布的改变。

分岔总是同演化方程解的定性性质改变联系着的。定态的生成是方程从无解到有解,定态的消失是方程从有解到无解;定态稳定性的改变也就是方程解的稳定性的改变。(1)和(2)是平庸的分岔,线性系统也可能出现。例如,系统(3.3.8)在参量空间的 $a=0$ 处发生定态创生(a 从大到小变化时)或消失(a 从小到大变化时)的分岔现象。其余几条属于系统的非平庸性质,只能出现于非线性系统中。

研究分岔现象发生的条件,确定分岔解的类型和个数,构造分岔解的解析表达式,判别分岔解的稳定性,描述分岔曲线或曲面(高维系统)的特点,阐述分岔的系统学意义,等等,构成了分岔理论。

分岔是非线性动态系统的一种通有现象。普利高津指出:“分岔是系统各部分与系统及其环境之间的内禀差别的表现。”⁴物理系统,一般自然系统,乃至生物、社会、思维或心理等复杂系统,普遍存在分岔现象。图3.6.1就是一个呈现分岔现象的物理系统。在社会系统中,个人、家庭、公司、民族、国家乃至整个人类作为系统,在其生存演化过程中都存在分岔现象。

3.6.3 1维系统的典型分岔类型

状态空间维数对系统动力学特性的巨大影响,也表现于分岔现象。首

先讨论 1 维系统。

(1) 鞍结分岔(saddle-node bifurcation)

用几何方法讨论一阶方程

$$x' = a + x^2 \quad (3.6.1)$$

描述的 1 维系统, a 为控制参量, 可以取正数、负数、0。 $a > 0$ 时不动点方程

$$a + x^2 = 0 \quad (3.6.2)$$

没有实数解, 表示系统没有定态; $a < 0$ 时有两个实数解 $x = \pm\sqrt{-a}$, 系统有一个稳定定态和一个不稳定定态。在参量空间中, 从 a 由大到小的变化方向看, 系统出现定态的创生; 从 a 由小到大的变化方向看, 系统出现定态点的消失。总之, 系统在 $a = 0$ 处分岔。图 3.6.3 在 $x' - x$ 平面上描绘出这些内容。由于分岔点 $a = 0$ 是半稳定的, 称为鞍结点, 表示随着控制参量变化系统通过出现鞍结点而引起定态的创生或消失, 故称为鞍结分岔。

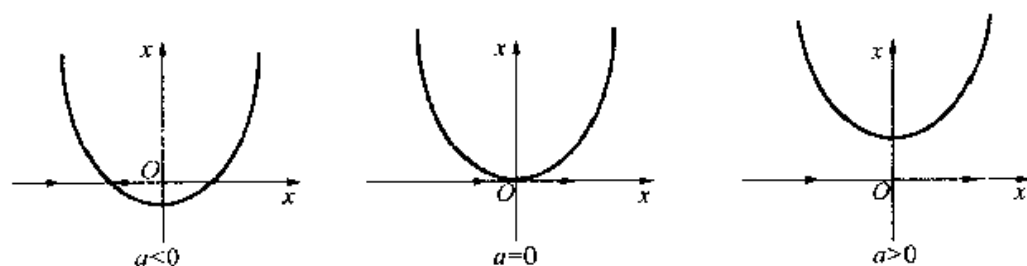


图 3.6.3

在以控制参量 a 和状态变量 x 张成的乘积空间中, 鞍结分岔的分岔图如图 3.6.4 所示:

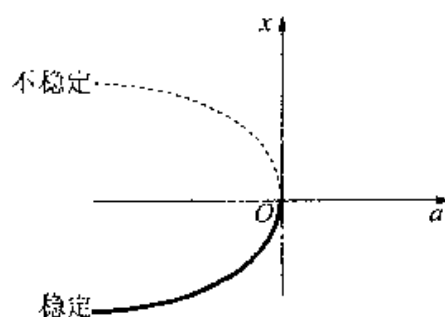


图 3.6.4

(2) 跨临界分岔(transcritical bifurcation)

考察系统

$$x' = ax - x^3 \quad (3.6.3)$$

不动点为 $x_1 = 0$ 和 $x_2 = a$ 。与前一系统不同,这个系统在整个 a 轴上都有解,不存在不动点的创生或破坏,分岔表现为定态稳定性的改变。在 $a < 0$ 时, $x_1 = 0$ 是稳定的, $x_2 = a$ 是不稳定的。在 $a > 0$ 时, $x_1 = 0$ 变为不稳定, $x_2 = a$ 变为稳定。稳定性的交换属于定性性质改变,故 $a = 0$ 是分岔点。如图 3.6.5 所示。

(3) 叉式分岔 (pitchfork bifurcation)

前述鞍结分岔的特点是,越过临界点只有一个稳定分支,不对称。另一类广泛存在的分岔现象具有明显的对称性,不动点成对地对称出现或消失。考察以下系统

$$x' = ax - x^3 \quad (3.6.4)$$

不动点方程为

$$ax - x^3 = 0 \quad (3.6.5)$$

当 $a < 0$ 时,只有 1 个实数解 $x = 0$,代表系统的稳定平衡态。当 $a > 0$ 时,有 3 个不动点 $x_1 = 0$, $x_2 = \sqrt{a}$, $x_3 = -\sqrt{a}$,代表 3 个可能的平衡态。容易证明,此时 x_1 变为不稳定的, x_2 与 x_3 为稳定态。 $a = 0$ 为分岔点,当 a 从负值增大而跨越这一点时,系统既有新定态的创生和稳定态数目的增加,又有稳定性的交换,标志着系统定性性质发生显著改变。未跨越这一点,控制参量 a 的变化只能引起系统的量变。图 3.6.6 表示,控制参量 a 从左向右越过分岔点后,随着 a 不断增大,原来的稳定定态失去稳定性而成为不稳定分支,新的稳定定态形成上下对称的两个分支。图 3.6.1 所示钢条在负载增大时出现的弯曲就是叉式分岔的一个物理模型。

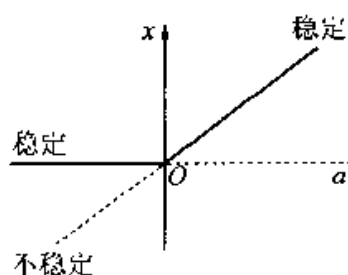


图 3.6.5

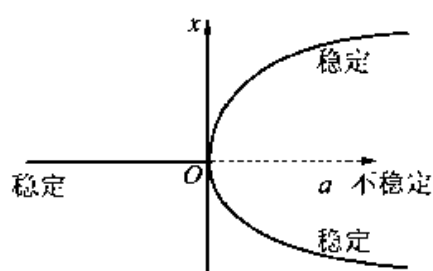


图 3.6.6

叉式分岔又有两种类型。图 3.6.6 为超临界 (supercritical) 叉式分岔,特点是控制参量由小到大超越临界点时出现分岔。下面讨论一个亚临界分岔的例子。考察系统

$$x' = ax + x^3 \quad (3.6.6)$$

当 $a > 0$ 时,唯一不动点 $x = 0$ 是不稳定的; $a < 0$ 时出现两个不稳定不动点 $x = \pm\sqrt{a}$,形成上下对称的两支, $x = 0$ 成为稳定的。因为分岔是在 a 小于临界值时发生的,故称为亚临界(subcritical)叉式分岔。图 3.6.7 示意了这种情形。

系统

$$x' = ax + x^3 - x^5 \quad (3.6.7)$$

具有图 3.6.8 所示的分岔机制。对于小 x ,当 $a < 0$ 时 $x = 0$ 为稳定不动点,两个向右弯的分支为不稳定不动点, $a = 0$ 为临界点。由于 x^5 项的作用,存在另一个临界点 $a_c (< 0)$,跨过这一点出现两个大幅值的稳定不动点分支。在 $a_c < a < 0$ 范围内,当初态 x_0 较小时,系统选择定态 $x_e = 0$;当初态 x_0 足够大时,系统在两个上下对称的稳定分支中选择定态。这是一种滞后(hysteresis)现象。

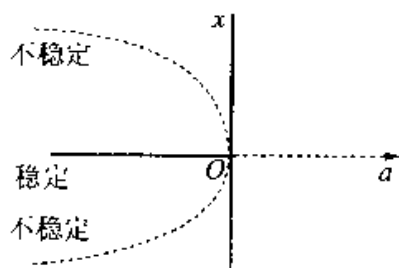


图 3.6.7

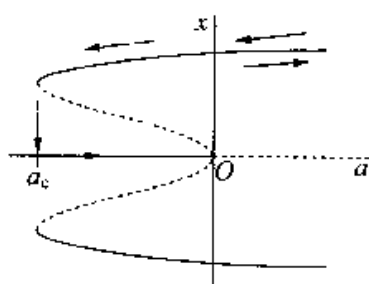


图 3.6.8

3.6.4 多维系统的典型分岔类型

在 2 维以上的系统中,上节所说的分岔现象都存在。但由于存在极限环、环面、奇怪吸引子等复杂定态,分岔现象变得极其丰富多样。有以下几种重要分岔类型:

(1) 单焦点分岔为极限环

在连续动态系统中,不动点的分岔发生在特征值 λ 的实部 $\text{Re}\lambda = 0$ 处。如果有两个复共轭特征值

$$\lambda_1 = \lambda' + i\omega, \lambda_2 = \lambda' - i\omega \quad (3.6.8)$$

λ' 在复平面由上方或下方穿过虚轴(叉式分岔的特点是 λ' 沿实轴穿越虚轴)。在 λ' 由负变正的过程中, $\lambda' = 0$ 为分岔点,分岔前的定态为一个稳定焦点,分岔后该点失稳,生出一个稳定极限环,称为霍普夫分岔(Hopf bifurcation),如图 3.6.9 所示。

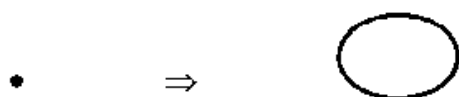


图 3.6.9

(2) 单极限环分岔

在许多情形下,控制参量的改变可能引起原来稳定的极限环失稳,分岔出新的稳定极限环。一种典型情形是单个实数 λ 变正,原极限环失稳,分岔出两个新的稳定极限环,如图 3.6.10 所示。

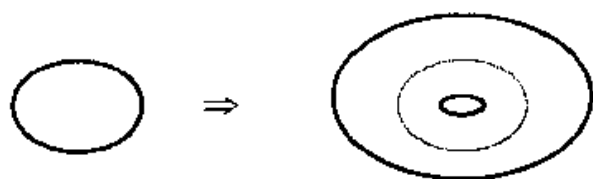


图 3.6.10

如果一个复特征值取得正实部,可能出现由一个平面极限环分岔为一个 3 维空间极限环,如图 3.6.11 所示。



图 3.6.11

一个具体例子是达芬方程(3.5.4),取 $a = 0.35, b = 6.6$,出现一个极限环,在 $x-x'$ 平面上的投影如图 3.6.12 所示。

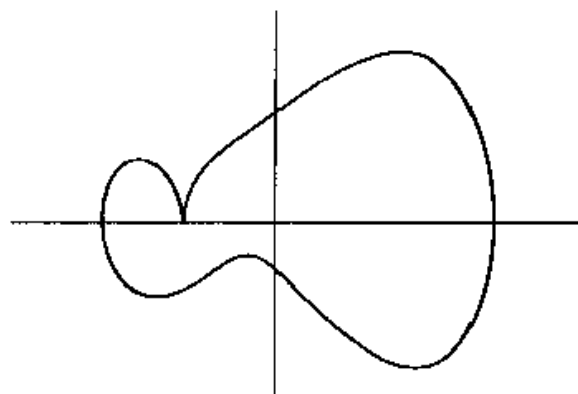


图 3.6.12

(3) 环面分岔

控制参量变化还可能引起从极限环分岔出环面,或者从环面分岔出另一同维环面(类似于从极限环分岔出新的极限环),或者从低维环面分岔出高维环面。这里不再展开讨论。

(4) 有序吸引子分岔出奇怪吸引子

不动点、极限环和环面都属于简单有序运动的吸引子,有时称为平庸吸引子。控制参量的进一步变化还可能导致所有可能的平庸吸引子都失稳,出现奇怪吸引子。3.8节将讨论非线性动态系统在奇怪吸引子上的非平庸运动。

3.6.5 逐级分岔序列与多样性

一般情形下,在控制参量变化的全过程中,系统并非只出现一次分岔,而是一系列前后相继的分岔。图 3.6.13 示意了单参量 λ 变化导致的分岔序列,形象地显示出随着不断分岔,系统的多样性也不断增加。

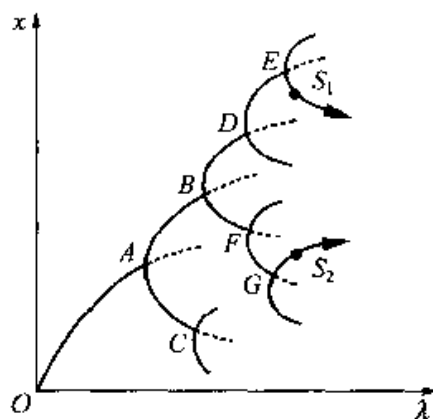


图 3.6.13

上图是基于只有一个控制参量的 1 维系统的叉式分岔作出的。如果考虑多控制参量的多维系统,考虑所有可能的分岔方式,分岔导致的系统演化多样性将丰富复杂得多。

图 3.6.13 还表明,分岔把历史性赋予系统。系统后续演化所建立的定态,与它前面经历的分岔路径密切相关。历史性就是系统当前的稳定定态对其形成路径的依赖性或相关性。现在的状态 S_1 和 S_2 分别是按照 $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow S_1$ 和 $A \rightarrow B \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow S_2$ 两条路线演化而来的,包含不同的历史积淀,造成 S_1 和 S_2 的不同特征。鉴于物理系统也存在分岔现象,分岔理论表明物理系统的演化过程同样具有历史性。

当系统在分岔点上存在两个或两个以上稳定新解时,系统面临如何选择的问题。存在两种基本选择方式。在一般情形下,如果没有外部作用,几个新解是对称的,有相同的机会接受选择。这时,将由偶然因素决定哪个新的稳态被选择,称为自发对称破缺选择。如果外部环境中存在某种力量,迫使系统对某个新稳态有所偏好,偶然因素不起作用,系统将在外部因素诱导下打破对称、作出选择,称为诱导对称破缺选择,如图 3.6.14 所示。虚线代表没有外部诱导作用的自发对称破缺选择,实线代表诱导作用造成的对称破缺选择。

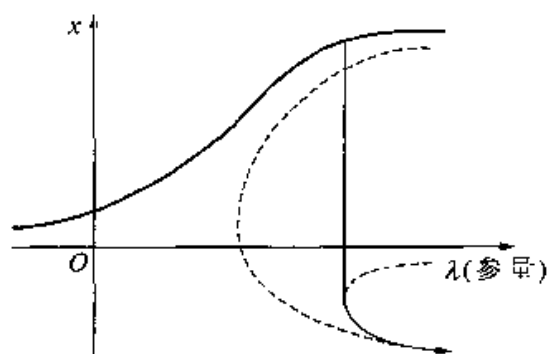


图 3.6.14

3.7 突变

在系统演化中,分岔总是伴随着突变现象,即系统定性性质的突然改变。分岔和突变是对同一动力学现象从不同角度的解释。用系统观点阐述什么是突变、突变发生的条件、突变的类型、突变的系统学意义等问题的科学理论,称为突变理论。

3.7.1 渐变与突变

从物理世界到生物世界,从自然界到社会领域,从物质世界到思维或意识世界,我们都可以看到系统演化有渐变和突变两种基本形式。突变理论证明,不论构成系统的基质特性和引起结构或形态变化的“力”的性质如何,只要控制参量变化到分岔点上,就会出现从一种定态向另一种定态的突变。突变不是某个对象领域特有的罕见现象,而是动力学系统的普遍属性,突变是非线性系统的通有行为,只要满足一定条件,突变就会由系统的内在因素产生出来。[严格地说,本节讲的突变有两种含义。一是相对于渐变的骤变(sudden change)强调变化发生的瞬时性、骤然性,指的是在可以忽略的时间

间隔内完成的变化;二是突变论讲的突变(catastrophe),指的是非常剧烈的变化。]

传统观点把突变视为灾难性现象,力求避免系统出现突变。突变理论反对这种价值判断,主张把突变当作一种客观现象加以研究。从工程实践看,突变多半是灾难性的,如桥梁突然断裂、锅炉突然爆炸,应力求避免。但从系统演化观点看,突变往往具有非常积极的作用。突变理论的开创者托姆指出:“这种‘突变’是系统得以‘生存的手段’,可用来帮助系统脱离通常的特征状态。因此,出现(突变论意义下的)突变显然是件好事。”⁵

从系统学看,渐变导致突变对应着结构稳定与结构不稳定的相互转化。处处结构稳定的系统不可能发生突变,处处结构不稳定的系统事实上不可能存在,没有必要考虑它的突变问题。既存在结构稳定的区域,又存在结构不稳定区域,此类系统才可能出现从渐变到突变的转化。在结构稳定的区域内系统只有渐变,一旦走出结构稳定区域,就会出现从此一稳定态向彼一稳定态的突变。

3.7.2 初等突变的基本类型

有势系统(3.5.2)的突变,称为初等突变。托姆证明,初等突变的基本类型主要由控制参量的个数 r 决定。当 $r \leq 4$ 时,有以下 7 类基本突变(表 3.7.1):

表 3.7.1 初等突变基本类型

突变名称	控制参量个数	势函数
折叠(fold)	1	$a_1 x + x^3$
尖拐(cusp)	2	$a_1 x + a_2 x^2 \pm x^4$
燕尾(swallow tail)	3	$a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + x^5$
蝴蝶(butterfly)	4	$a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \pm x^6$
椭圆脐(elliptic umbilic)	3	$a_1 x + a_2 y + a_3 y^2 + x^2 y - y^2$
双曲脐(hyperbolic umbilic)	3	$a_1 x + a_2 y + a_3 y^2 + x^2 y + y^2$
抛物脐(parabolic umbilic)	4	$a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + x^2 y + y^4$

当 $r \leq 5$ 时,共有 11 种基本初等突变。除上述 7 种外,增加了印地安人茅舍型突变、第二椭圆脐型突变、第二双曲脐型突变、符号脐型突变。尖拐突变是折叠突变之外最简单的突变,又是最典型的突变,下面以它为代表稍作讨论。

3.7.3 尖拐突变

考虑由以下势函数描述的系统

$$V(x) = x^4 + ax^2 + bx \quad (3.7.1)$$

已经指出,有势系统只有不动点型定态。系统(3.7.1)的不动点方程为

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} = 0 \quad (3.7.2)$$

亦即

$$4x^3 + 2ax + b = 0 \quad (3.7.3)$$

此系统有1维相空间即 x 轴,2维参量空间即平面 $a-b$,构成3维乘积空间 $a-b-x$ 。全部不动点构成乘积空间的一张曲面 M ,如图3.7.1(i)所示。这是一张光滑曲面,从原点 $(0,0,0)$ 开始,在 $a \leq 0$ 半空间中,曲面 M 上有一个逐渐扩展的三叶折叠区,上叶、下叶是 $V(x)$ 的极小点,势函数稳定;中叶是 $V(x)$ 的极大点,势函数不稳定。折叠曲面的两条棱,即上叶与中叶、中叶与下叶的分界线,具有重要的动力学意义。将(3.7.3)两边微分,得

$$12x + 2a = 0 \quad (3.7.4)$$

求解联立方程组(3.7.3)和(3.7.4),得出棱上的所有点,称为退化定态点。投影到参量平面 $a-b$ 上,即从(3.7.3)和(3.7.4)中消去 x ,得

$$8a^3 + 27b^2 = 0 \quad (3.7.5)$$

这个方程代表参量平面 $a-b$ 上两支由原点 $(0,0)$ 引出的尖拐曲线,其上的每个点都是系统的分岔点,因而称为分岔曲线,如图3.7.1(ii)所示。分岔曲线是参量平面中结构不稳定点的集合。当控制参量 a, b 的变化没有到达此曲线时,系统只有量的改变;一旦跨越分岔曲线,系统就会出现定性性质的改变,或者从上叶跳到下叶,或者从下叶跳到上叶。

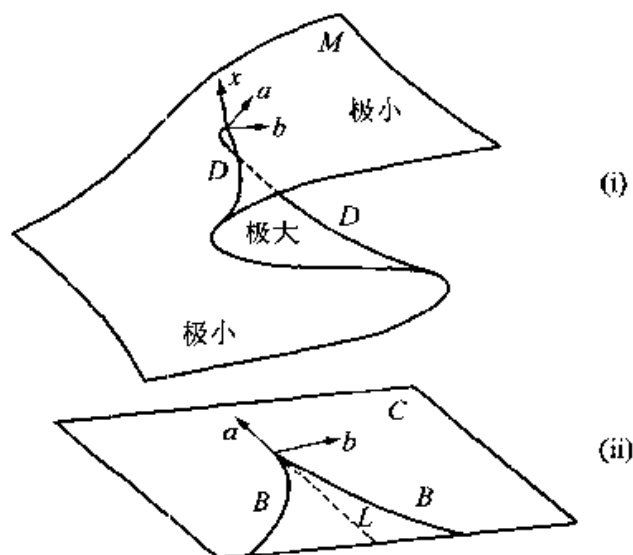


图 3.7.1

从这个模型可以看到突变现象的以下基本特征：

(1) 多稳态 突变系统一般具有两个或两个以上的稳定定态(折叠突变除外),即对应于同一组控制参量,势函数有不同的极小点,因而可以出现从一个稳态向另一稳态的跳跃。尖拐突变是双稳态,更复杂的系统可能出现三个以上的稳态。

(2) 不可达性 在不同稳定定态之间存在不稳定定态(极大点),它们是实际上不可能实现(达到)的定态。在尖拐突变中,三叶折叠曲面中叶上的点就是不可达的。

(3) 突跳 在分岔曲线上,系统从一个极小点到另一极小点的转变是突然完成的。在尖顶突变中,从上(下)叶到下(上)叶的过渡都是突然发生的。

(4) 滞后 如图 3.7.2 所示,在尖顶突变中,当控制参量沿路径 1 变化首先碰到的是分岔曲线的右支,但不出现突跳,须到分岔曲线左支的 α 点时,系统才会发生突跳;沿路径 2 变化时,首先碰到的是分岔曲线的左支,但不发生突跳,须到右支的 β 点时才出现突跳。这种现象称为滞后,反映突变的发生与控制参量变化的方向有关。

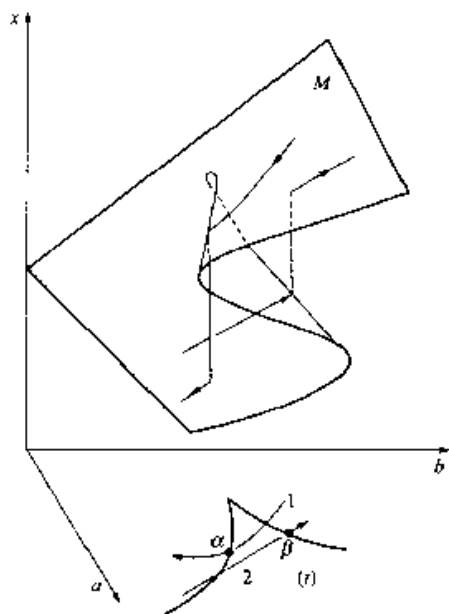


图 3.7.2

(5) 发散 从参量平面看,系统的最终走向对控制参量变化路径一般都不敏感,但在分岔曲线附近,控制参量变化路径的微小不同能够引起系统

最终走向的重大差别。在分岔点附近系统终态对控制参量变化路径的敏感依赖性,称为发散。

3.7.4 参量空间的相图分布

在状态空间中,由于控制参量是一组常数,系统相图是确定的,动力学规律的变化对系统行为的影响仅仅表现于吸引子的分布和吸引域的划分,不确定的只是初态落在哪个吸引域。对于自治系统,此时的动力学问题归结为初态问题。在参量空间中考察系统,由于控制参量是可变的,可以全面考察动力学规律对系统行为的影响。在参量空间中,我们考察的不再只是某个系统的相图,而是整个系统族所有可能相图的变化和分布。动力学规律把参量空间划分为若干区域,代表定性性质不同的相图类型。控制参量在同一区域变化只能引起相图发生量的改变,定性性质是相同的。参量从一个区域变化到另一区域,必然导致相图定性性质的改变。按照相图定性性质不同划分整个参量空间,描述各个区域相图的基本特征,确定不同区域的分界线,以及从一个区域向另一区域的过渡,是在参量空间中研究系统的基本内容。下面就两个特例作些讨论。

【例 3.7.1】 讨论线性系统(3.1.8)。以 τ 和 μ 为广义控制参量,张成 2 维参量空间 $\tau-\mu$ 平面。图 3.7.3 是特征值在 $\tau-\mu$ 平面上的分布。

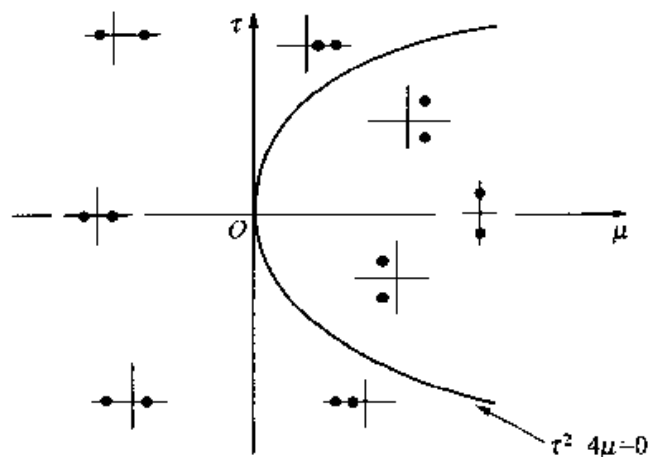


图 3.7.3

图 3.7.4 是该系统的不动点的分布,分以下几种情形:

- (1) $\mu < 0$, 左半平面上,特征值为实数,且一正一负,不动点为鞍点;
- (2) $\mu > 0$, $\tau^2 - \mu < 0$, 在曲线围成的区域内,特征值为一对共轭复数,不动点为焦点,上半平面是不稳定焦点,下半平面是稳定焦点;

(3) $\mu > 0, \tau^2 - 4\mu > 0$, 夹在曲线与 τ 轴之间区域中的不动点是结点, 上半平面是不稳定的, 下半平面是稳定的。

图 3.7.4 中三条分界线值得注意。 μ 轴的右半轴为中心点集, 是稳定焦点与不稳定焦点的分界线。抛物线

$$\tau^2 - 4\mu = 0 \quad (3.7.6)$$

为焦点与结点的分界线, 对应的特征根为一对重实根, 代表退化结点 (degenerate node), 焦点与结点通过此类点而相互过渡。 τ 轴由非孤立不动点组成。三条分界线中, 最重要的是由中心点组成的那条, 其上的点代表一类稳定定态。

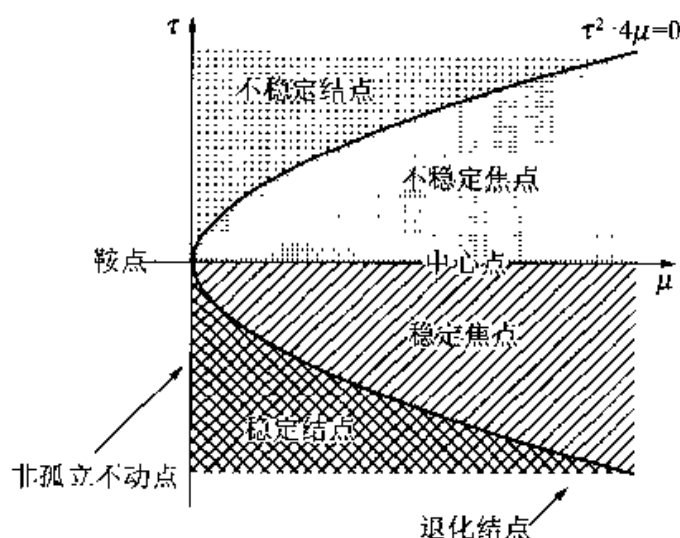


图 3.7.4

【例 3.7.2】非线性系统仅讨论尖拐突变(3.7.1)。如图 3.7.5 所示, 参量平面 $a-b$ 被尖拐分岔曲线分为两个区域, 上部为 I 区, 势函数只有一个极小点。下部为 II 区, 势函数有一个极大点和两个极小点。I、II 区分别代表两种定性性质不同的相图, 分岔曲线上的点代表结构不稳定的态。在同一区域内, 控制参量变化只能引起势函数的量变。例如, 在 I 区内, 左半平面与右半平面的差别在于极小点偏左或偏右, 从上半平面跨过横轴后, 势函数出现拐点, 到分岔曲线上成为水平拐点, 为生成新的极小点做好准备。在 II 区内, 纵轴上的点具有左右对称的势函数, 左半平面和右半平面的势函数不再对称, 但差别只在于深、浅势阱的位置对调。

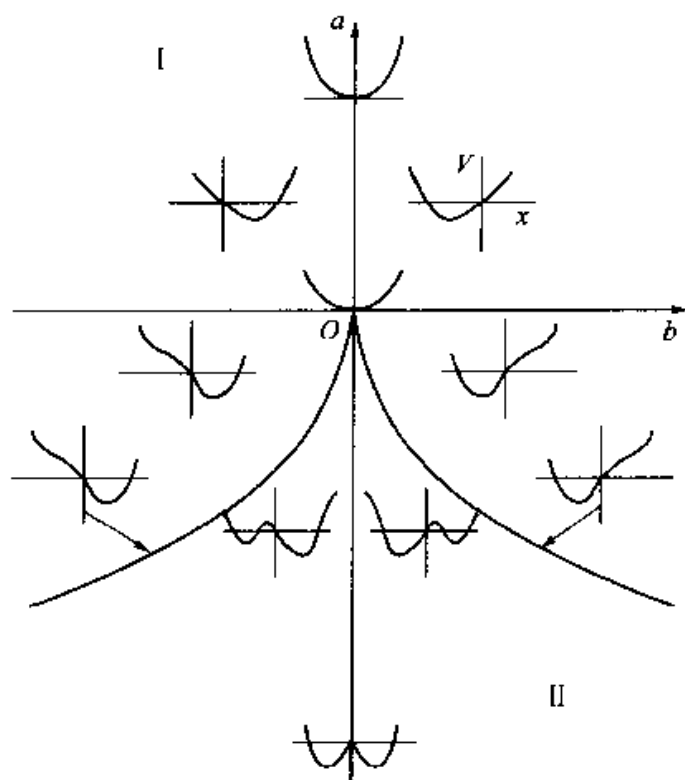


图 3.7.5

3.8 连续混沌

当对象是 1 维或 2 维连续非线性动态系统时,不论控制参量如何改变,系统经过分岔、突变所出现的新运动体制只能是平衡态或周期态,即简单有序运动。对于 3 维以上的系统,如果在参量空间中按照适当方式改变控制参量,系统经过一系列分岔、突变,所有可能出现的平衡态、周期态、准周期态都失去稳定性,这时就会出现一种表观极其混乱无序、极不规则、异常复杂的运动形式。100 多年来,科学家虽在不同场合下碰到过这类现象,但都没有意识到它代表一种新的运动体制,未加深究。直到 20 世纪 60 年代以来才发现,这种异常复杂的、表观上极其混乱无规的运动,是确定性方程描述的非线性动态系统的一种尚未认识的定态,一种叫做混沌(chaos)的复杂有序运动体制。线性系统不可能出现混沌运动,混沌运动是非线性系统特有的现象(但并非所有非线性系统都会出现混沌)。本节讨论连续系统混沌运动的几个著名例子。

3.8.1 洛伦茨方程

洛伦茨(E. N. Lorenz)把一个描述大气运动的 7 阶偏微分方程经过展开、截断之后,简化为以下 3 阶非线性微分方程组

$$\begin{aligned}x' &= -\sigma(x-y) \\y' &= rx - y - xz \\z' &= xy - bz\end{aligned}\quad (3.8.1)$$

这是一个 3 维连续动态系统, x, y, z 为状态变量, σ, r, b 为控制参量。洛伦茨在计算机上用数值模拟实验的方法发现,在适当的控制参量下,这个简单的确定性系统能够呈现混沌行为。这是耗散系统混沌研究的开创性工作。

平衡运动、周期运动和准周期运动的吸引子都是相空间的规则点集,相轨道是规则的几何图形,即所谓整形,用传统几何方法足以描述。混沌运动的吸引子是相空间的分形点集,称为分形吸引子或奇怪吸引子。取 $\sigma = 10$ 、 $b = 8/3$ 、 $r = 28$ 进行计算,甩掉开头反映瞬态的数据,把计算结果标在相空间,得到图 3.8.1 所示的奇怪吸引子,称为洛伦茨吸引子。这是一个 3 维空间的分形点集,由两叶组成,形状类似于一对蝴蝶翅膀。

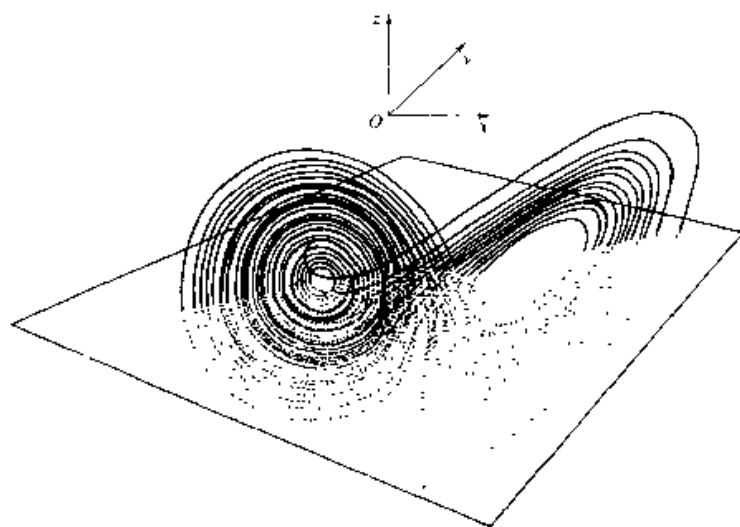


图 3.8.1

以 r 为分岔参量,在控制空间中对洛伦茨系统的分岔、混沌运动的完整描述如表 3.8.1 所示⁶。

表 3.8.1

参数 r 的取值范围	系统定态
< 1	趋向无对流的定态
$1 \sim 13.926(r_0)$	趋向三个不动点之一
$13.926 \sim 24.06(r_1)$	存在无穷多个周期和混沌轨道
$24.06 \sim 24.74(r_2)$	一个奇怪吸引子, 一对稳定不动点
$24.74 \sim 148.4$	混沌区, 其中
$99.526 \sim 100.79$	为一个内嵌的倍周期序列
$145.9 \sim 148.4$	为倍周期分岔序列
$148.8 \sim 166.07$	周期区
$166.07 \sim 233.5$	混沌区, 其中
$166.07 \sim 169$	从周期到混沌的阵发过渡
233.5 附近	与 148.4 附近类似的分岔序列
$233.5 \sim \infty$	周期区, 由 $r = \infty$ 往下的倍周期序列

3.8.2 勒斯勒尔方程

勒斯勒尔 (O. Rössler) 对洛伦茨方程作了进一步简化, 得到下述以他命名的方程

$$\begin{aligned}
 x' &= -(y + z) \\
 y' &= -x + ay \\
 z' &= b + z(x - c)
 \end{aligned}
 \tag{3.8.2}$$

a, b, c 为控制参量。在参量空间的某些区域, 此系统也表现出混沌行为。取 $a = b = 0.2$, c 为分岔参量。此系统可以看作围绕洛伦茨吸引子的某个环建立的一个流模型。随着参量 c 从 2 增加到 4.2, 系统运动体制从简单的周期 1 振荡 (平衡运动) 经过分岔, 周期逐步加倍, 形成一个倍周期分岔 (period doubling bifurcation) 序列。当 $c = 4.2$ 时, 系统开始进入混沌运动, 奇怪吸引子如图 3.8.2 所示 (按 $c = 5.7$ 计算)。

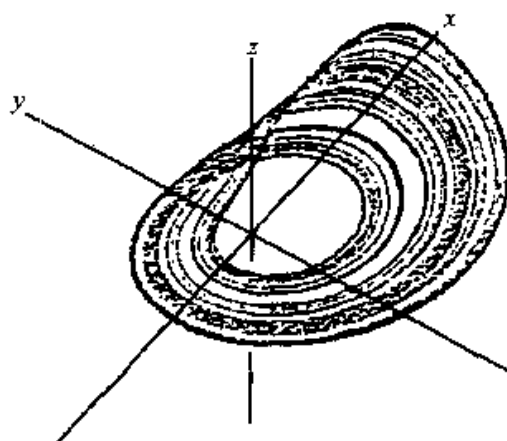


图 3.8.2

3.8.3 达芬方程

讨论以下达芬方程描述的强迫系统(输入为规则的余弦函数)

$$x'' + 0.05x' + x^3 = 7.5\cos t \quad (3.8.3)$$

它有单一混沌吸引子。初态取为 $x' = x = 0$, 以数值积分求解方程, 略去瞬态值, 在 $x-t$ 平面上画出定态解的图象, 得图 3.8.3。为更清楚地观察吸引了定态, 图中时间序列取到 200π 。

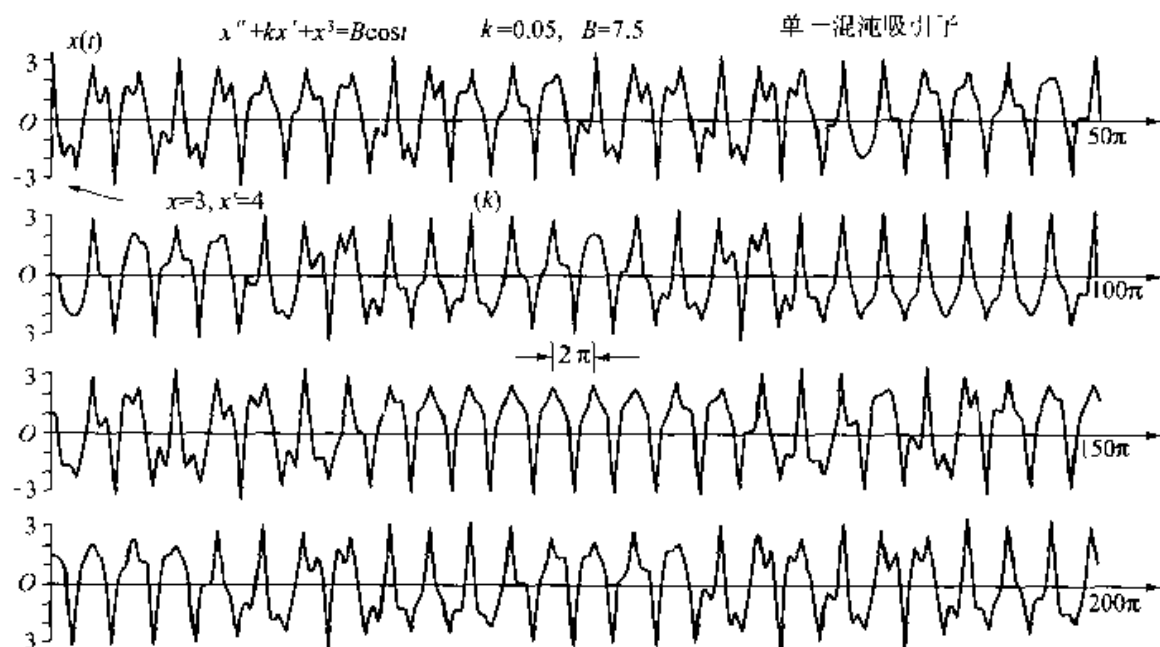


图 3.8.3

由该图看到此定态有如下特点:

(1) 回归性, 但不规则, 即非周期振荡(波形在不规则的区间上重复);

(2) 类随机性, 行为的不规则与随机运动原则上无法区分, 但动力学方程和外作用项为确定的, 因而是确定性系统的内禀随机性;

(3) 运动轨道对初态极为敏感, 如图 3.8.4 所示, 从相邻的两个初态 $(3, 4)$ 和 $(3.01, 4.01)$ 出发的两条轨道开始时几乎重合, 经过指数式相互分离, 很快就产生显著差别。

这些特点表明, 达芬方程描述的系统已进入混沌定态。

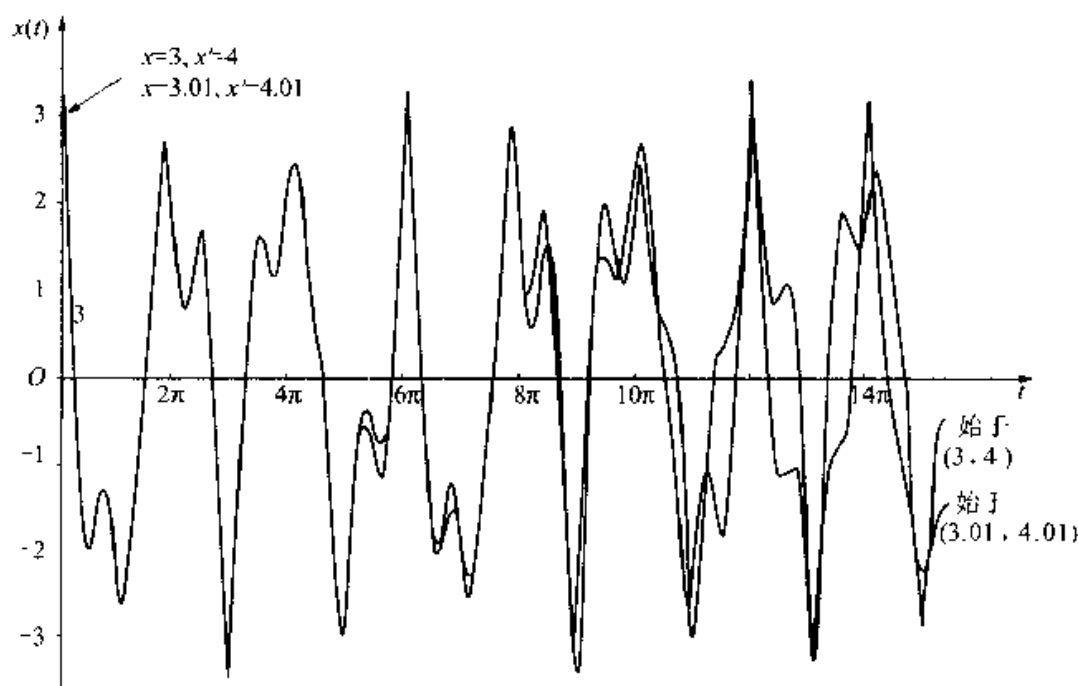


图 3.8.4

3.8.4 混沌的特点

混沌至今仍无公认严格定义。这里仅就以上两个例子简单说明它的基本特征, 进一步的讨论见 4.2 节。

(1) 非周期性 混沌是非线性动态系统的一种可能定态, 轨道在相空间不是单调变化的, 但又不是周期性的, 而是非周期地曲折起伏变化的。发现混沌表明, 把系统的非单调行为判定为要么瞬态运动、要么周期运动的传统观点是错误的。洛伦茨把他关于混沌的开创性论文命名为“确定性非周期流”, 就是要澄清这种观点。

(2) 奇怪吸引子上的动力学行为 耗散系统的混沌都是发生在奇怪吸引子这种分形结构上的运动体制, 只有相空间中具有某种自相似结构的分

形点集才能描述这种复杂运动。洛伦茨吸引子和勒斯勒尔吸引子都是这种点集,任意取出一部分放大看,仍然像整体那样极不规则、具有无穷精细结构和某种自相似性。

(3) 既是稳定的,又是不稳定的 奇怪吸引子对外部的轨道有吸引力,进入吸引子就不可能再走出,因而整体是稳定的。但吸引子内部的不同轨道相互排斥,极不稳定。形象地说,混沌运动是“对外吸引,对内排斥;进得来,出不去;出不去,又安定不下来”。

(4) 确定性随机性 混沌系统的轨道一旦进入奇怪吸引子,其不规则性原则上与随机运动无法区分。以洛伦茨系统为例,相点在吸引子的一叶上由外向内绕行一段后,将随机地跳跃到另一叶上由外向内绕行,然后又随机地跳回头一叶,如此反复进行,每次跳跃都是随机发生的。其结果,任何两条轨道都可能时而接近,时而远离,显得混乱无规。研究单一混沌轨道没有意义,有意义的是研究奇怪吸引子上的轨道丛。但这种随机性是确定性系统自身内部非线性因素产生的,与外部条件无关。

(5) 长期行为不可预测性 由于是确定性系统,短期行为可预测;由于初态敏感依赖性(详细讨论见 4.2 节),系统的长期行为同随机运动一样无法预测。这是混沌运动既不同于简单有序运动(短期行为和长期行为都可以预测),又不同于随机运动(短期行为与长期行为都无法预测)的另一主要特征。但简单的宣布混沌运动不可预见是错误的。系统演化方程是确定的,奇怪吸引子在相空间的位置是确定的,短期行为可以预测,吸引子上的运动服从某种概率规律,具有统计意义上的可预见性。这些特点决定了混沌运动仍有某种可预见性。发现混沌在某些方面又增强了人的预见能力。

3.9 过渡过程特性

前面几节讨论的都是定态行为,在结束本章前还有必要讨论系统如何从初态开始经过一系列暂态最终趋达定态的过渡过程(transient process),亦即系统的瞬态行为。原则上讲,系统的任何可能状态(相空间的每个点)都可以作为初态,但初态就是定态的情形可以略而不论。因为一则如果初态就是定态,系统不存在过渡过程问题;二则定态点在相空间极为稀少,少到初态落在定态点事实上是不可能的。动力学的初态问题,作为扰动因素造成的系统对定态的偏离,只考虑以暂态点为初始状态的动力学行为。所以,我们可以合理地假定初态总是相空间的某个暂态点。

由于现代动力学建立在实数连续统上,每条暂态轨道都代表一个无穷过程,即使以稳定定态为终态的暂态轨道,理论上也要在 $t \rightarrow \infty$ 才能完成过渡过程。但真实系统要求在有限时间内完成过渡过程,否则谈过渡过程就没有任何实际意义。问题在于现实世界不是连续统,不可能无限分割,且存在扰动因素,使得实际暂态过程都能在有限时间间隔内到达终态。其次,实际情形并不要求系统绝对地到达终态,只要实际状态与终态的差距足够小就算结束了过渡过程。所以,动态系统的过渡过程是一个有意义的科学问题。

最简单的是向平衡态的过渡。不论是振荡式地过渡到平衡态(焦点型),还是非振荡式地过渡到平衡态(结点型),只要实际状态与平衡态差距足够小就可以认为过渡过程结束了。图 3.9.1 示意的是正规结点型过渡过程。图 3.9.2 示意的是焦点型过渡过程。

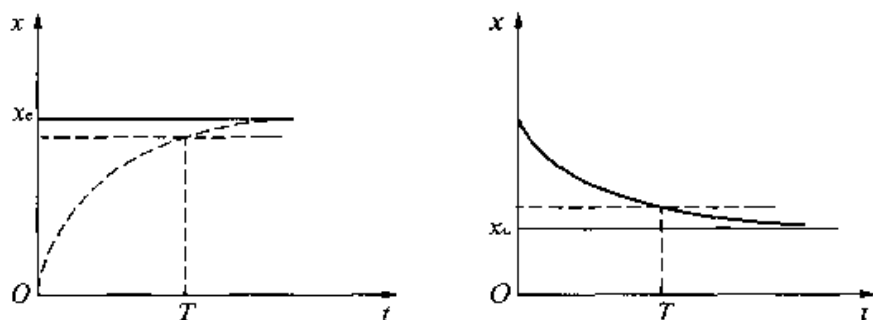


图 3.9.1

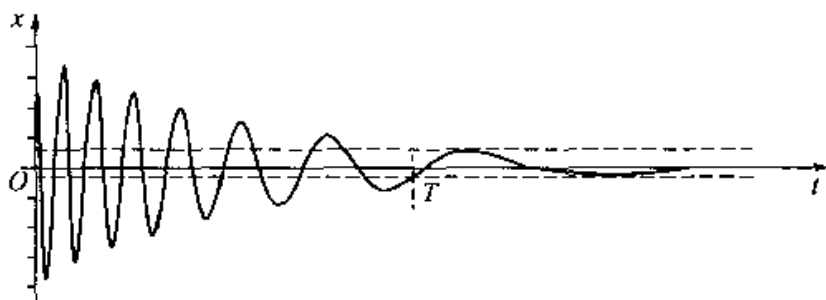


图 3.9.2

向周期态的过渡总是通过螺旋型瞬态轨道实现的,或者从极限环内部的初态开始,或者从极限环外部的初态开始。图 3.9.3 是达芬方程(3.8.3)的过渡过程。

如果吸引了是极限环,在过渡过程进行到一定阶段后,螺旋型轨道与极

限环的闭轨道很难区分,判断过渡过程是否结束较不动点要困难。最困难的是向混沌吸引子的过渡,称为过渡混沌。过渡过程越接近分形吸引子,轨道所带的混沌成分越多,极长周期与非周期很难区分,判断过渡过程是否结束要更困难。

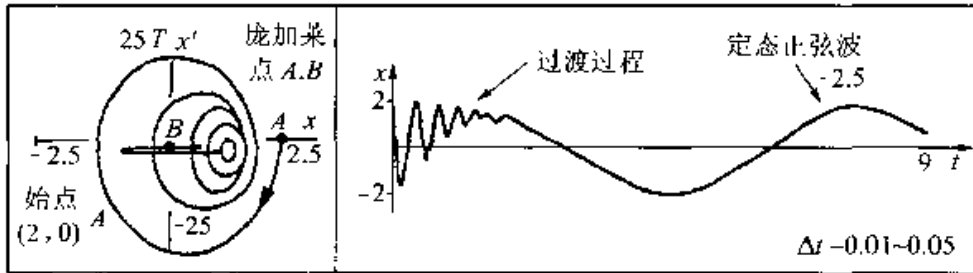


图 3.9.3

自由系统的过渡过程完全由系统的动力学规律和初态决定。强迫系统的过渡过程特性,包括过渡过程的轨道形状、过渡时间的大小快慢、过程是否平稳等,同外来强迫作用有极大关系。当强迫作用项可以人工操纵(人工控制)时,重要的是根据系统自身的动力学特性,恰当选择强迫作用项,以保证过渡过程的快速性和平稳性要求都能得到满足。

以上讨论的都是系统如何从初态向吸引子的过渡过程问题。动态系统还需要讨论走出排斥子的过渡过程问题。当控制参量变化导致原稳定态失稳后,原来的吸引子变为排斥子,但其影响不会立即消失,还在或长或短的时期中继续发生或大或小的作用,使得走出排斥子的过程带有已失稳定态的成分(有些学者称之为“失稳态的幽灵”⁷⁾)。走出混沌排斥子一般要更复杂、更困难。因此,走出排斥子也是过渡过程理论必须研究的重要问题。^{8~10}

第4章 离散动态系统

在第3章中,研究的系统状态变量均为实数,并在连续变化的实数时间框架中,用连续动力学系统模型分析、描述了系统的存在和演化的种种性质,如吸引子、稳定性、混沌、分岔与突变。本章将转向讨论离散动态系统,主要研究离散混沌、元胞自动机、布尔网络、L-系统等几种自动器网络模型,以及遗传算法。本章中涉及到的离散动态系统实际上包含两类,一类是把系统的连续时间进行离散化,即把时间当作迭代的步骤(时间间隔相等)或一次逻辑转移(时间间隔可能不相等),状态变量仍为连续的;另一类是状态变量的离散化,离散型状态变量不论是数字的还是符号的,它们都只具有逻辑代数的结构。

4.1 离散映射与离散动力学

本节主要介绍与本章内容有关的离散映射和离散动力学系统的基本概念,包括不动点、周期点、离散时间系统的稳定性、自动器网络模型等概念。

4.1.1 离散映射

对第3章中研究的连续动力学系统 φ 进行离散采样,考察每隔一定时间间隔 τ 时系统的状态,得到一个双边序列

$\dots \varphi_{-2\tau}, \varphi_{-\tau}, \varphi_0 = id, \varphi_\tau, \varphi_{2\tau}, \dots$, 其中 $\varphi_0 = id$ 为恒等映射,这一序列由同胚的映射 $f = \varphi_\tau$ 生成

$$\varphi_{k\tau} = \underbrace{\varphi_\tau \circ \varphi_\tau \circ \dots \circ \varphi_\tau}_k = f \circ f \circ \dots \circ f = f^k \quad (4.1.1)$$

$$\varphi_{-k\tau} = \underbrace{\varphi_{-\tau} \circ \varphi_{-\tau} \circ \dots \circ \varphi_{-\tau}}_k = \underbrace{f^{-1} \circ f^{-1} \circ \dots \circ f^{-1}}_k = f^{-k} \quad (4.1.2)$$

因此, $f = \varphi_\tau$ 称为连续动力学系统 φ 在时刻 τ 的映射。

另外,同胚映射 f 未必是某个动力学系统在时刻 τ 的映射,但它也生成一个双边序列

$$\dots f^{-2}, f^{-1}, f^0 = id, f^1, f^2, \dots \quad (4.1.3)$$

这里, $f^0 = id$ 为恒等映射, $f^k = f \circ f^{k-1}$, $f^{-k} = (f^{-1})^k$ 。该序列显然满足

$$f^{k+l} = f^k \circ f^l, \forall k, l \in Z \quad (4.1.4)$$

与连续动力学系统的情形相类似,这种由同胚映射 f 生成的双边序列称作离散动态系统,同胚映射 f 称作离散映射。

在实际处理离散动态系统这类应用系统时,常常碰到的就是求解下列迭代代数方程

$$x(n+1) = f(x(n)), (n=0,1,2,\dots) \quad (4.1.5)$$

其中, $x \in X$, $x(0)$ 为初始值, $f: X \rightarrow X$ 为离散映射:

$$\begin{aligned} x(1) &= f(x(0)) \\ x(2) &= f(x(1)) = f^2(x(0)) \\ &\vdots \\ x(n) &= f(x(n-1)) = f^n(x(0)) \end{aligned} \quad (4.1.6)$$

我们的基本目的是了解迭代过程的最终或渐近性态。因此,迭代求解的实质也就是(4.1.5)所示的离散映射是否收敛于某一不动点 x^* 。所谓迭代收敛于不动点指:

$$x(k+1) = f(x(k)) = x(k) = x^* (k \rightarrow \infty) \quad (4.1.7)$$

或者

$$x^* = f(x^*) \quad (4.1.8)$$

下面定义 n 周期点和最终周期点。 n 周期点:

$$\left. \begin{aligned} f^k(x^*) &= x^* \quad \text{当 } k=n \\ f^k(x^*) &\neq x^* \quad \text{当 } k=1,2,\dots,n-1 \end{aligned} \right\} \quad (4.1.9)$$

其中:1 周期点: $f(x^*) = x^*$;

2 周期点: $f^2(x^*) = x^*$ 且 $f(x^*) \neq x^*$;

3 周期点: $f^3(x^*) = x^*$ 且 $f^2(x^*) \neq x^*$ 和 $f(x^*) \neq x^*$ 。

最终 n 周期点:如果存在 $m > 0$,使得 $f^{n+m}(x^*) = f^m(x^*)$,对于一切 $i \geq m$, $f^i(x^*)$ 是 n 周期的。

通过迭代求解代数方程收敛于不动点,实质上也就是离散动力学系统的平衡点是否满足渐近稳定性。依照线性稳定性理论¹, n 维系统:

$$x(k+1) = A_{n \times n} x(k) \quad (4.1.10)$$

当且仅当系数矩阵 A 的所有特征根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 有 $|\lambda_i| < 1 (i=1,2,\dots,n)$ 时,系统是渐近稳定的,即

$$\left\{ \begin{aligned} &|\lambda_i| < 1, \text{ 对所有 } i, \text{ 系统渐近稳定} \\ &|\lambda_i| = 1, \text{ 存在一个 } i, \text{ 系统临界稳定} \\ &|\lambda_i| > 1, \text{ 存在一个 } i, \text{ 系统不稳定} \end{aligned} \right.$$

4.1.2 自动器网络模型

自动器网络系统是离散动态系统的一种,其模型的基本结构可用数学中的图来表示。它由若干结点及连接这些结点的边构成。在图论中,我们也常用结点表示一个系统的元素,用边表示系统元素之间的联系,从而用图来表示一个系统的结构。但在将要介绍的由大量简单自动器组成的复杂网络模型中,我们还可引入不同层次的动力学,即每个结点表示一子系统,它们有各自的动态行为,结点之间的联接强度也可能发生变化,由此反映元素间作用关系的变化。从这种意义上讲,这类网络模型比简单的图与网络更能恰当地表示和描述一般系统。

一般地,上述网络模型中的每个结点(或元素)都可以看作是一自动器,因而这些网络模型又可以称为自动器网络模型或称为自动器网络。下面我们分别介绍自动器网络中的自动器和网络的结构。若干自动器(automaton)又称自动机(automata 复数),它的研究始于冯·诺伊曼,现已广泛应用于研究计算机、控制系统以及人的神经系统、自繁殖细胞等。自动器的经典定义可以简单地表示为三种集合与两个映射(如图 4.1.1 所示),它是 4.1.1 节中离散映射的特殊形式。

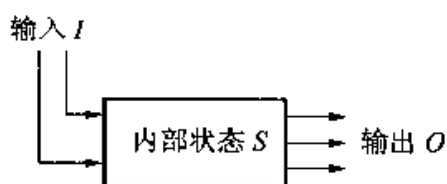


图 4.1.1 自动器结构

输入符号集 $I = \{i\}$, 状态变量集 $S = \{s\}$, 输出变量集 $O = \{o\}$, 其中 i, s, o 均为矢量。

映射 $f: I \times S \rightarrow S$, 即 $s_{t+1} = f(i_t, s_t)$ 为状态变化函数, 它将系统在 t 时刻的输入和状态映射为系统在 $t+1$ 时刻的状态。

映射 $g: I \times S \rightarrow O$, 即 $o_{t+1} = g(i_t, s_t)$ 为输出函数, 它将系统在 t 时刻的输入和状态映射为系统在 $t+1$ 时刻的输出。

自动器的状态集一般都是离散和有限的, 因而这类自动器又称为有限自动器。有时也可以扩展为可数无穷的。函数 f, g 可以具有各种不同的性质, 从而就定义了不同的自动器。

当自动器的内部状态与输出状态一致时, 这类自动器称为状态输出器,

对其描述可以得到极大的简化(集合 S 与集合 O 相同),我们讨论的自动器即属此类。

许许多多的自动器连在一起,就构成了自动器网络。如果一个自动器网络具有规则的晶格结构,每个元素是完全一样的有限自动器(相同的局部联接即输入集相同和输出函数相同),且元素间的联接强度为常数,这样的自动器网络称为元胞自动机(cellular automata)。若自动器网络的元素是布尔自动器(状态为 0 和 1)且状态函数为布尔开关函数,元素间联接强度不变,则我们得到布尔网络(Boolean network)。当元素间联接强度可随时间变化时,网络的行为就变得更复杂,这将是神经网络要讨论的问题。

复杂系统理论中研究的自动器网络模型的共同特点有:

- (1) 涉及的元素数量较大(从几个到成千上万个);
- (2) 元素间局部联接;
- (3) 系统总体体现了鲜明的涌现性。

【例 4.1.1】 如下面一自动器网络有 5 个结点,其结构如图 4.1.2 所示,每个结点具有两个输入和两个输出。

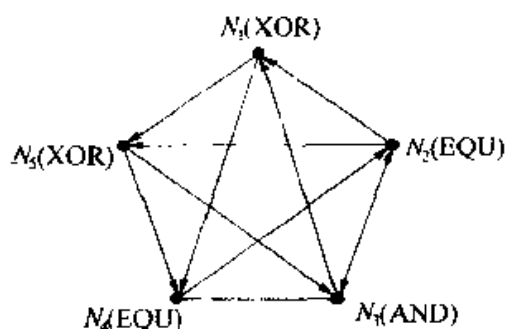


图 4.1.2 5 个结点组成的布尔自动器网络

各个结点都是布尔自动器,即其状态只有 0 和 1,且状态函数是布尔函数。各结点的状态函数并不完全一样,它们分别表示如下($s(i)$ 代表第 i 个自动器的状态):

$$\begin{aligned}
 s(1) &= \text{XOR}(s(2), s(3)) \\
 s(2) &= \text{EQU}(s(3), s(4)) \\
 s(3) &= \text{AND}(s(4), s(5)) \\
 s(4) &= \text{EQU}(s(5), s(1)) \\
 s(5) &= \text{XOR}(s(1), s(2))
 \end{aligned}
 \tag{4.1.11}$$

其中 AND, XOR 和 EQU 为布尔逻辑函数。

表 4.1.1 中列出了 16 种具有两个输入的布尔自动器的状态函数(即具有两个变量的所有布尔函数的真值表)。

表 4.1.1 两个变量的布尔函数真值表

输出 函数代码及名称	输入		输入		输入		输入	
	输入 1	输入 2	输入 1	输入 2	输入 1	输入 2	输入 1	输入 2
	1	1	1	0	0	1	0	0
0	0		0		0		0	
1 NOR	0		0		0		1	
2	0		0		1		0	
3	0		0		1		1	
4	0		1		0		0	
5	0		1		0		1	
6 XOR	0		1		1		0	
7 NAND	0		1		1		1	
8 AND	1		0		0		0	
9 EQU	1		0		0		1	
10	1		0		1		0	
11	1		0		1		1	
12	1		1		0		0	
13	1		1		0		1	
14 OR	1		1		1		0	
15	1		1		1		1	

假设该自动器网络的动态行为由并行迭代的法则所规定,即所有自动器在同一时刻改变其状态。

$$\begin{aligned}
 s(1)_{t+1} &= \text{XOR}(s(2)_t, s(3)_t) \\
 s(2)_{t+1} &= \text{EQU}(s(3)_t, s(4)_t) \\
 s(3)_{t+1} &= \text{AND}(s(4)_t, s(5)_t)
 \end{aligned}
 \tag{4.1.12}$$

$$s(4)_{t+1} = \text{EQU}(s(5)_t, s(1)_t)$$

$$s(5)_{t+1} = \text{XOR}(s(1)_t, s(2)_t)$$

那么根据上面的法则,该自动器网络的动态行为可表述为状态变化表如下,其中10进制数码为该系统的状态代码,对应的二进制数表示该系统各元素的实际状态(表4.1.2)。

表 4.1.2 对应的二进制数表示的系统实际状态表

t 时刻 状态代码	t 时刻 状态	$t+1$ 时刻 状态	$t+1$ 时刻 状态代码	t 时刻 状态代码	t 时刻 状态	$t+1$ 时刻 状态	$t+1$ 时刻 状态代码
0	00000	01010	10	16	10000	00010	2
1	00001	10010	18	17	10001	11010	26
2	00010	11011	27	18	10010	10011	19
3	00011	00011	3	19	10011	01011	11
4	00100	01001	9	20	10100	00001	1
5	00101	10001	17	21	10101	11001	25
6	00110	11000	24	22	10110	10000	16
7	00111	00000	0	23	10111	01000	8
8	01000	01000	8	24	11000	00100	4
9	01001	10000	16	25	11001	11100	28
10	01010	11001	25	26	11010	10101	21
11	01011	00001	1	27	11011	01101	13
12	01100	01011	11	28	11100	00111	7
13	01101	10011	19	29	11101	11111	31
14	01110	11010	26	30	11110	10110	22
15	01111	00010	2	31	11111	01110	14

根据上面的迭代,我们可以得到下面的状态变化“有向图”(类似于连续动态系统中的相图),如图4.1.3所示。这样,我们就可以知道该系统存在一个点吸引子(状态8)及两个周期吸引子(状态25→28→7→0→10→25和状态19→11→1→18→19)。该系统只存在于上面三种稳定状态(状态3是

不稳定点)。

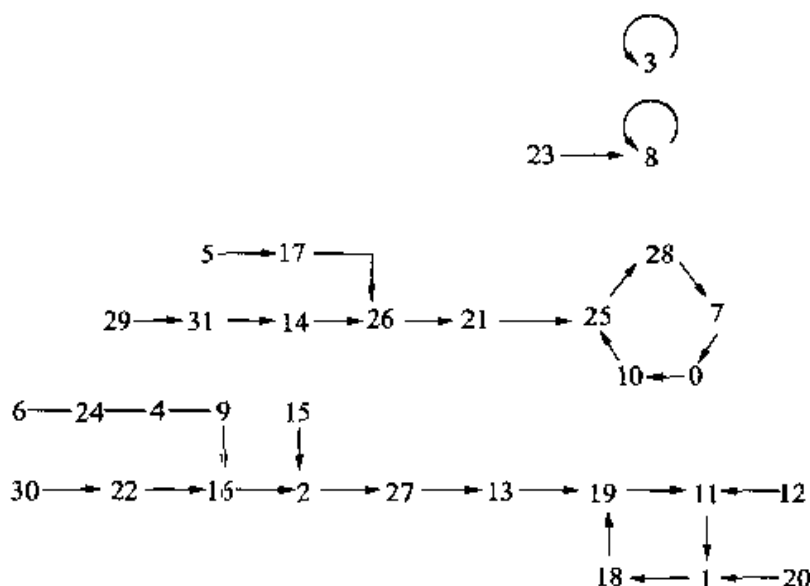


图 4.1.3 自动器网络的状态变化图

4.1.3 符号动力学

4.1.2 节中提到的布尔自动器网络模型的状态只有 0 和 1, 这两个数字只是两个符号, 本质上只是不同事物的一种标识, (4.1.12) 实际上就是我们要提的符号模型。

我们对符号模型的动力学状态有了-一定了解之后, 就可以研究更一般的符号动力学系统。考虑 N 个符号的集合, 例如 N 个数字的集合 $S(N) = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 。对该集合赋予离散拓扑(即 $S(N)$ 的每个子集都是开集), 成为一个拓扑空间。再将其离散化: $\forall a, b \in S(N)$, 定义距离

$$\rho(a, b) \equiv |a - b| = \begin{cases} 1 & \text{若 } a \neq b \\ 0 & \text{若 } a = b \end{cases} \quad (4.1.13)$$

可数个这样的空间 $S_i = S(N)$ 的笛卡尔积

$$\Sigma_N = \prod_{i=-\infty}^{+\infty} S_i \quad (4.1.14)$$

或

$$\Sigma_N^+ = \prod_{i=0}^{+\infty} S_i \quad (4.1.15)$$

称作符号空间。其元素分别为双边符号序列 $\{s_n\}_{n=-\infty}^{+\infty}$ 或单边符号序列 $\{s_n\}_{n=0}^{+\infty}$ 。这是一个由 $0, 1, 2, \dots, N-1$ 符号组成的无穷序列, 把这样一个无穷序列看成是符号空间中的单个点, 不考虑这些无穷序列的收敛性。我

们的离散映射模型将作用在这个符号空间。这个符号空间中由 0 和 1 组成的无穷序列的集合

$$\Sigma_2^+ = \{s = (s_0 s_1 s_2 \dots) \mid s_j = 0 \text{ 或 } 1\}$$

被称为关于两个符号 0 和 1 的序列空间。 Σ_2^+ 的元素是像 (000...) 或 (111...) 这样的无穷序列。我们可用下面的方法把 Σ_2^+ 变成距离空间: 对于两个序列 $s = (s_0 s_1 s_2 \dots)$ 和 $t = (t_0 t_1 t_2 \dots)$, 定义它们之间的距离为

$$d(s, t) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{|s_i - t_i|}{2^i} \quad (4.1.16)$$

因为 $|s_i - t_i|$ 是 0 或 1, 该无穷级数被几何级数 $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{2^i} = 2$ 所控制, 所以它是收敛的。

例如 $s = (000\dots)$ 和 $t = (111\dots)$, $d(s, t) = 2$ 。又如 $r = (1010\dots)$, 则

$$d(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2i}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{4}} = \frac{4}{3}。$$

从距离的定义可以证明, d 是 Σ_2^+ 上的度量。度量 d 使我们能够判断 Σ_2^+ 的哪些子集是开的, 哪些子集是闭的, 哪些序列是相互接近的。同样, 从距离的定义可以证明下面的命题。

设 $s = (s_0 s_1 s_2 \dots)$ 和 $t = (t_0 t_1 t_2 \dots) \in \Sigma_2^+$, 且假设 $s_i = t_i$, 对于 $i = 0, 1, 2, \dots, n$, 则 $d(s, t) \leq \frac{1}{2^n}$ 。反过来, 如 $d(s, t) < \frac{1}{2^n}$, 则 $s_i = t_i$, 对于 $i \leq n$ 。

利用这个结论很快就可以判断两个序列是否相互接近, 并且可以定义 Σ_2^+ 上的移位映射这一符号动力学中的重要映射。

移位映射 $\alpha: \Sigma_2^+ \rightarrow \Sigma_2^+$, 即由 $(s_1 s_2 s_3 \dots) = \alpha(s_0 s_1 s_2 \dots)$ 给出。移位映射简单地“忘掉”序列中的第一项, 把其他的向左移一位。显然 α 是 Σ_2^+ 上的一个映射, 因 s_0 可取 0 或 1, 在上面定义的度量下, α 是一连续映射。

在 4.2 节离散混沌中我们将看到逻辑斯谛方程实质上是一移位映射确定的模型。4.1.1 节描述的离散系统的动力学特性, 如周期性可以用移位映射更直观地表示。周期点恰恰对应于重复的序列 $s = (s_0 \dots s_{n-1} s_0 \dots s_{n-1} s_0 \dots s_{n-1} \dots)$ 。因此, α 存在 2^n 个 n 周期点, 每一个皆由 2^n 个长度为 n 的 0 和 1 的有限序列之一所组成。有些序列经过有限次移位映射后变成重复序列, 这样的最终重复序列称为最终周期点。例如, 任何形如 $(s_0 \dots s_n u_0 u_0 u_0 \dots)$ 的序列是最终不动点, 任何形如 $(s_0 \dots s_n u_0 u_1 u_0 u_1 \dots)$ 的序列

是最终 2 周期点。对于 α 来说, 周期点构成 Σ_2^+ 上的稠密子集。当然 Σ_2^+ 中的点也并非全是周期或最终周期的, 事实上, Σ_2^+ 中非周期序列的数目大大超过周期序列的数目。

一般地, Σ_2^+ 上这一距离 d 的定义, 可以推广到符号空间 Σ_N^+ 上。符号动力学是本章的主要论题之一, 它将以各种变形出现在以后的各节中。

4.2 离散混沌

这里所讲的离散混沌是指由迭代关系定义的离散时间系统中的混沌。许多生物学现象用迭代方程描述比用微分方程描述要容易理解, 例如在群体生物学中, 有最简单的“无世代重叠”群体, 每一年的个体数仅依赖于前一年的个体数, 即 $x_{t+1} = f(x_t)$, 其中 t 是离散的世代时间, x 是一代中的个体数。由迭代关系定义的离散时间系统中的混沌最容易理解, 它也是非线性动力学系统最容易理解的形式。

4.2.1 周期倍化通向混沌

我们以 1 维逻辑斯谛方程为例:

$$x_{n+1} = f(x_n) = \mu x_n (1 - x_n) \quad (4.2.1)$$

式中 $x_n \in [0, 1]$ 为状态变量, $\mu \in [0, 4]$ 为控制参量。这样一个非常简单的 1 维非线性方程的迭代, 却给出了十分丰富的复杂性结果, 生物学中常用它来描述虫口动态行为, 更复杂的还有描述虫口动态行为的洛特卡-沃尔泰拉模型 (Lotka-Volterra model) 等。

通过迭代求解代数方程 (4.2.1), 若收敛于不动点, 则它实质上也就是离散动力学系统的不动点并满足渐近稳定性。运用离散动力学系统的稳定性原理, 对于 (4.2.1), 不动点满足条件:

$$x^* = f(x^*) = \mu x^* (1 - x^*) \quad (4.2.2)$$

(1) 当 (4.2.1) 中的 $\mu < 1$ 时, 只有不动点 $x_0^* = 0$ 。在 $x_0^* = 0$ 处, 特征根 λ 的绝对值 $|f'(0)| = \mu < 1$, 系统为渐近稳定的。当 $\mu = \mu_0 = 1$ 时, $|f'(0)| = 1$, 系统处在临界状态, 其稳定性可用别的方法判断。

(2) 当 μ 由 $\mu_0 = 1$ 继续增加 (即 $\mu_0 < \mu < \mu_1$, μ_1 为第一个分岔点) 时, 将有 $|f'(0)| > 1$, 系统在 $x_0^* = 0$ 处线性失稳, 并达到新的不动点, 其值可由 (4.2.2) 两边除以 $x^* (\neq 0)$ 即 $1 = \mu(1 - x^*)$, 而得到 $x_1^* = 1 - \frac{1}{\mu}$, μ_1 可由稳定边界

$$f'(x^*) = \mu - 2\mu x^* = -1 \quad (4.2.3)$$

决定。将 x_1^* 的值代入(4.2.3), 可得 $\mu_1 = 3$, 即 $1 < \mu < 3$ 时, 在 x_1^* 处, $|f'(x_1^*)| < 1$, 系统为渐近稳定的, 详见图 4.2.1。

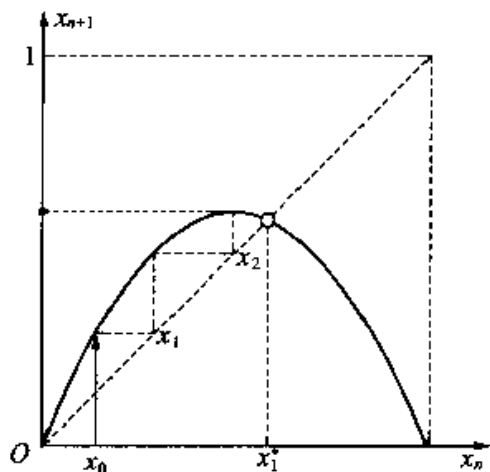


图 4.2.1 $\mu = 2.4$ 时, 不动点 $x_1^* = \frac{7}{12}$ 是稳定的

(3) 当 $\mu_1 < \mu < \mu_2$ (设为另一个分岔点) 时, 不动点 $x_1^* = 1 - \frac{1}{\mu}$ 又将线性失稳, 此时不动点变成 2 周期点:

$$\begin{aligned} f^2(x^*) &= ff(x^*) \\ &= \mu[\mu x^*(1-x^*)][1-\mu x^*(1-x^*)] = x^* \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

(4.2.4) 中可以消去一个 x^* , 余下的 3 次方程为:

$$\mu^2(1-x^*)[1-\mu x^*(1-x^*)] - 1 = 0 \quad (4.2.5)$$

此式整理后为:

$$x^{*3} - 2x^{*2} + \left(1 + \frac{1}{\mu}\right)x^* - \frac{\mu^2 - 1}{\mu^3} = 0 \quad (4.2.6)$$

(4.2.6) 分解因子, 可得:

$$\left(x^* - \frac{\mu-1}{\mu}\right) \left[x^{*2} - \left(1 + \frac{1}{\mu}\right)x^* + \frac{1+\mu}{\mu^2}\right] = 0 \quad (4.2.7)$$

第一个根 $x_1^* = 1 - \frac{1}{\mu}$ 已经线性失稳, 故新的不动点为:

$$x_{2,3}^* = \frac{1}{2\mu} [(1+\mu) \pm \sqrt{(\mu+1)(\mu-3)}] \quad (4.2.8)$$

将以上结果以不动点随 μ 变化绘成曲线, 示于图 4.2.2。图 4.2.2 中实线代表渐近稳定的不动点(吸引子或叫吸引不动点), 虚线代表不稳定的

不动点(排斥子或叫排斥不动点)。

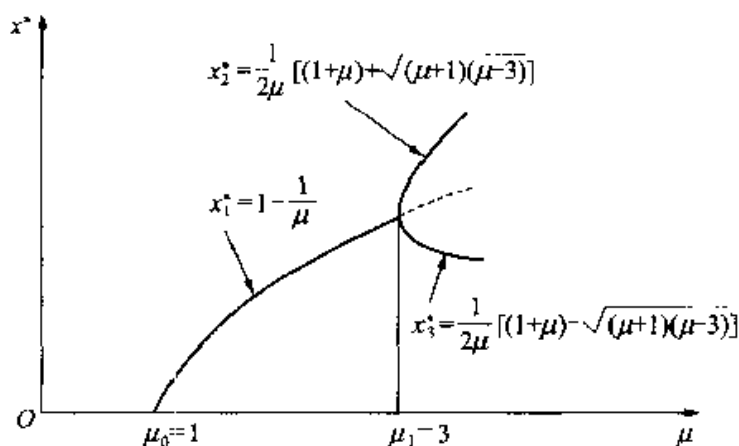


图 4.2.2 逻辑斯谛方程的周期倍化分岔

(4) 照此类推,逻辑斯谛方程的分岔是通过倍周期分岔,即 1 分为 2, 2 分为 4, 4 分为 8, ... 而实现的,相应地可计算出分岔值。对于 $\mu = \mu_{\infty} = 3.569\,945\,672$, 对应出现了混沌区。周期倍化通向混沌的曲线,见图 4.2.3 和表 4.2.1。

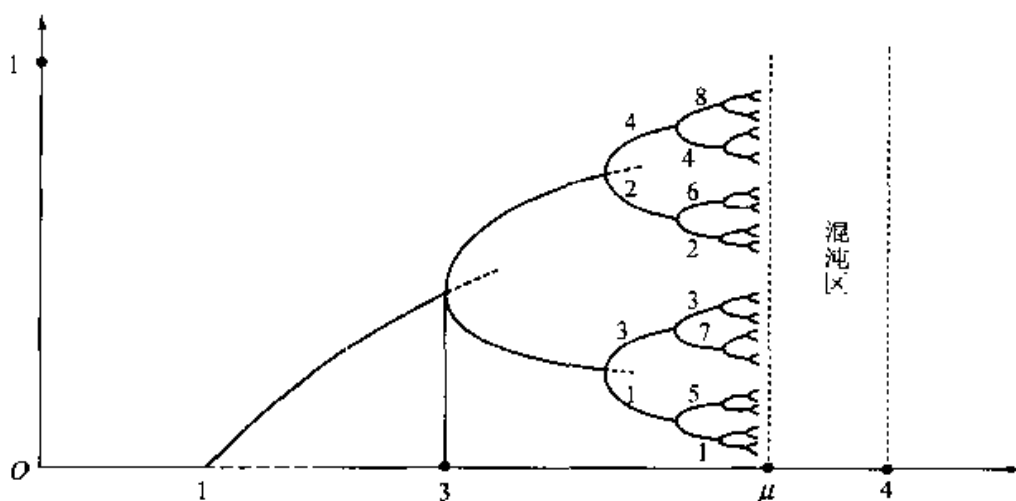


表 4.2.1 周期倍化分岔参数表

m	分岔情况	分岔值 μ_m	间距比值 $\frac{\mu_m - \mu_{m-1}}{\mu_{m+1} - \mu_m}$
1	1 分为 2	3	
2	2 分为 4	3.449 489 743	4.751 466
3	4 分为 8	3.544 090 359	4.656 251
4	8 分为 16	3.564 407 266	4.668 242
5	16 分为 32	3.568 759 420	4.668 74
6	32 分为 64	3.569 691 610	4.669 1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
∞	周期解 $\rightarrow$ 混沌	3.569 945 672	4.669 201 609...

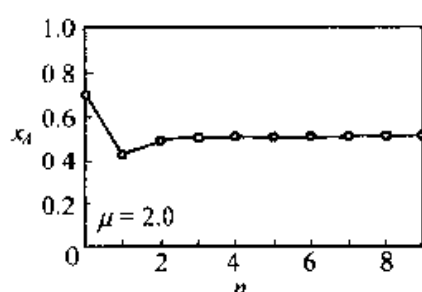


图 4.2.4 1 周期点

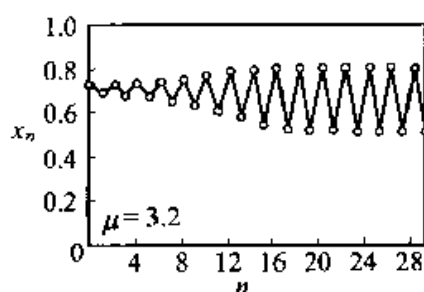


图 4.2.5 2 周期点

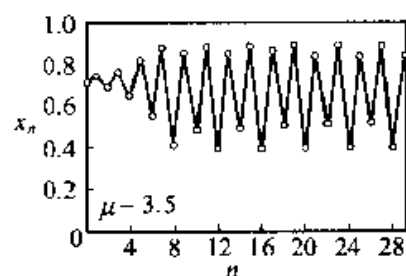


图 4.2.6 4 周期点

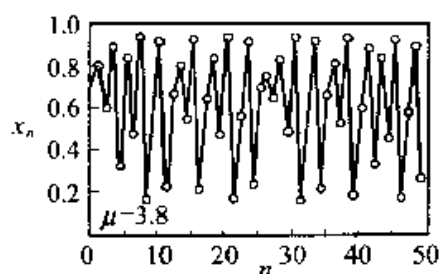


图 4.2.7 混沌

(6) 表 4.2.1 中的分岔值可以由以下两式联立求解得出:

$$\begin{aligned}
 f^M(x^*, \mu_m) &= x^* \\
 \left. \frac{d}{dx} f^M(x, \mu_m) \right|_{x=x^*} &= -1 \\
 m &\in \mathbb{Z}^+, M = 2^{m-1}
 \end{aligned} \tag{4.2.9}$$

4.2.2 倒分岔、窗口

深入对混沌区进行研究,可发现“乱中有序”,混沌之中还有结构。从 $\mu = 4$ 开始,考察 μ 渐减时系统的行为。开始时,混沌区是单片的。当 $\mu =$

$\mu_{(1)} = 3.678\ 573\ 510$ 时, 单片混沌区变成两片。当 μ 减少到 $\mu = \mu_{(2)} = 3.592\ 572\ 184$ 时, 混沌区由两片变成四片。照此类推, 1 变成 2, 2 变成 4, 4 变成 8, ..., 又得到倒分岔如表 4.2.2。

表 4.2.2 倒分岔的分岔点值

m	分岔情况	倒分岔值 $\mu_{(m)}$	间距比值 $\frac{\mu_{(m-1)} - \mu_{(m)}}{\mu_{(m)} - \mu_{(m+1)}}$
1	1 分为 2	3.678 573 510	4.840 442
2	2 分为 4	3.592 572 184	↓
3	4 分为 8	3.574 804 939	4.652 331
4	8 分为 16	3.570 985 940	4.671 741
⋮	⋮	⋮	⋮
∞	∞	3.569 945 672	4.669 201 609

其中

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \mu_{(m)} = \mu_{\infty} = 3.569\ 945\ 672$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\mu_{(m-1)} - \mu_{(m)}}{\mu_{(m)} - \mu_{(m+1)}} = \delta_{\infty} = 4.669\ 201\ 609 \quad (4.2.10)$$

δ_{∞} 仍是费根鲍姆数。而整个分岔、倒分岔的结构, 示于图 4.2.8。

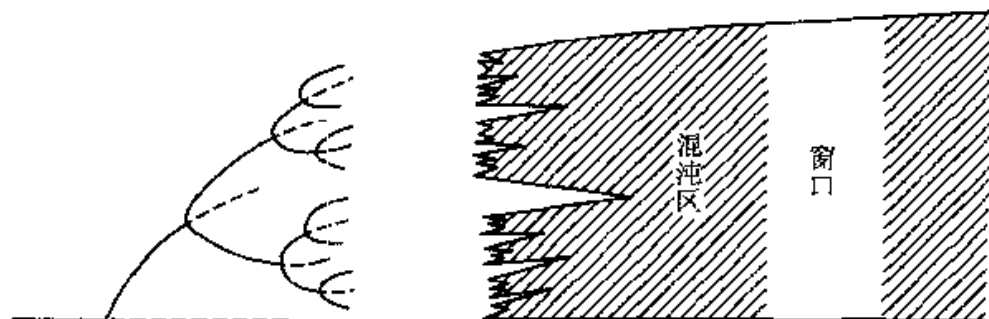


图 4.2.8

混沌区内除了倒分岔以外还有窗口, 窗口代表稳定周期解(有序)。混沌区内出现窗口, 这表示“乱中有治”。当 $\mu = 1 + \sqrt{8} = 3.828\dots$ 时, 方程 $x_{n+3} = x_n$ 有 8 个根, 除了原有两个不动点外, 还有三对重根满足:

$$343x^{*3} - 49(10 + \sqrt{2})x^{*2} + 7(13 + 16\sqrt{2})x^* - (41\sqrt{2} - 31) = 0 \quad (4.2.11)$$

这三个解是:

$$x_1^* = 0.1599, x_2^* = 0.5136, x_3^* = 0.9563$$

形成了周期3解,如图4.2.9所示。而且,这三个重根正好是 $fff(x)$ 与对角直线 $y=x$ 在 A 、 B 、 C 三点处相切,参见图4.2.10。

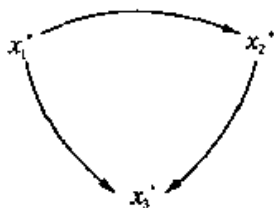


图 4.2.9 $\mu = 1 + \sqrt{8}$ 时出现 3 周期解

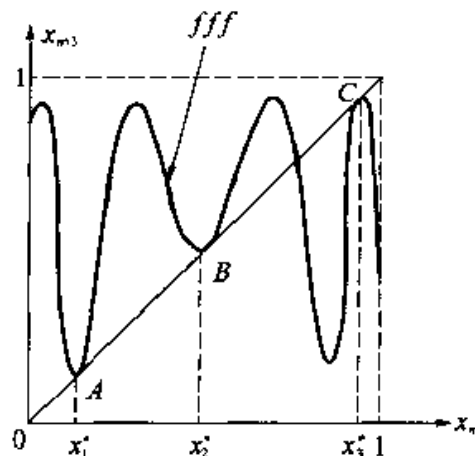


图 4.2.10 三个重根 x_i^* ($i=1,2,3$)

总之,逻辑斯谛方程的结果说明了以下几点:

- (1) 从十分简单的非线性方程式,可以引出如此丰富的复杂性结果,说明简单性与复杂性的统一;
- (2) 图 4.2.8 结构说明了“乱中有治,治中有乱”的道理;
- (3) 确定性与不确定性的统一。

4.2.3 2 维埃农迭代

下面我们讨论 2 维情况,2 维迭代一般形式为:

$$\varphi: \begin{cases} x_{(n+1)} = f(x_{(n)}, y_{(n)}) \\ y_{(n+1)} = g(x_{(n)}, y_{(n)}) \end{cases} \quad (4.2.12)$$

(4.2.12) 表示在平面上的一点 $P_n(x_{(n)}, y_{(n)})$, 经过变换(或映射) φ 变为另一点 $P_{n+1}(x_{(n+1)}, y_{(n+1)})$, 即 $P_{n+1} = \varphi P_n$, 或用映射表示:

$$\varphi: (x, y) \rightarrow (f(x, y), g(x, y)) \quad (4.2.13)$$

(4.2.12) 或 (4.2.13) 的不动点 (ξ, η) 满足:

$$\xi = f(\xi, \eta), \eta = g(\xi, \eta) \quad (4.2.14)$$

在不动点的邻域,其动态行为可以由线性化方程说明:

$$\begin{cases} (x - \xi) \rightarrow \frac{\partial f}{\partial x}(\xi, \eta)(x - \xi) + \frac{\partial f}{\partial y}(\xi, \eta)(y - \eta) \\ (y - \eta) \rightarrow \frac{\partial g}{\partial x}(\xi, \eta)(x - \xi) + \frac{\partial g}{\partial y}(\xi, \eta)(y - \eta) \end{cases} \quad (4.2.15)$$

非线性系统离不动点远处的行为与相应线性系统差别很大,尚没有线性系统所具有的很有规律性的分析方法。因此,通常先作线性分析,而后推广到非线性。我们以埃农迭代(Hénon iteration)为例,进行线性分析。

埃农 2 维迭代式为:

$$\varphi: \begin{cases} x_{(n+1)} = 1 + 0.3y_{(n)} - 1.4x_{(n)}^2 \\ y_{(n+1)} = x_{(n)} \end{cases} \quad (4.2.16)$$

雅可比矩阵为:

$$J = \left(\frac{\partial(x_{(n+1)}, y_{(n+1)})}{\partial(x_{(n)}, y_{(n)})} \right) = \begin{pmatrix} -2.8x_{(n)} & 0.3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.2.17)$$

由 $\det(J) = -0.3$, 说明每经一次迭代, 使任意面积单元缩小到原有面积的 0.3 倍。从 (4.2.14) 和 (4.2.16) 可得, 两个不动点为: $A(0.631, 0.631)$ 、 $B(-1.131, -1.131)$ 。将 A 点数值代入 (4.2.17), 求 $\det(J - \lambda I) = 0$ 的解, 可求得两个特征根为: $\lambda_1 = -1.924$, $|\lambda_1| > 1$ 对应不稳定的流形; $\lambda_2 = 0.156$, $|\lambda_2| < 1$ 对应稳定的流形。混沌只能出现在鞍点类型的不动点, 不动点 A 邻域的动态行为参见图 4.2.11。

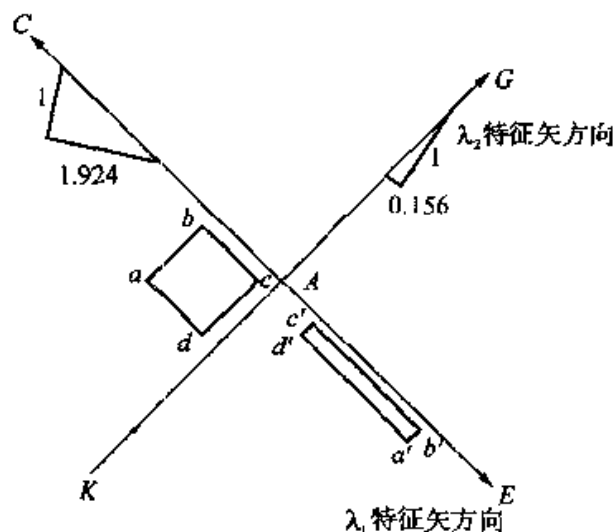


图 4.2.11 不动点 A 邻域的动态行为

在 A 点邻域沿两个特征矢方向取平行四边形 $abcd$, 经过 φ 的一次迭代后, 变换成 $a'b'c'd'$ 。在 λ_1 特征矢方向拉长到 1.924 倍, 在 λ_2 特征矢方向缩短到 0.156 倍。且由 $Je = \lambda e$ 可见, 在 λ_1 方向与 $-$ 号同向, 朝远离 A 点方向移动, 在 λ_2 方向与 $+$ 号同向, 朝靠近 A 点方向移动, 而且面积缩小到原来面积的 0.3 倍。照此类推, 经 φ 多次迭代的结果, 原来面积为 1 的 $abcd$ 点集,

其最终的极限是面积趋向于零的直线,它与直线 CAE 无限接近,但却远离直线 GAK 。实际系统是非线性的,系统在大范围的动态行为与线性结果并不完全一样,但某一给定面积点集,被“拉成”很窄、很长的线条,其面积趋向于零,这个特征,将在非线性中保留下来。

为了说明非线性大范围的动态行为,考虑图 4.2.12 所示的 $PQRS$ 四边形,它的每一边都是 x, y 的直线方程。设 $PQRS$ 围成的区域内点集为 D ,那么经这一次迭代后的点集为 φD ,它是由四段抛物线线段围成的四边形 $P'Q'R'S'$ 。从所给的埃衣迭代式(4.2.16),很容易找到这样的 $PQRS$,使得一次迭代后的 $P'Q'R'S'$ 完全位于 $PQRS$ 内部。一组满足以上条件的数据是: $P(-1.325, 1.39)$, $Q(1.32, 0.45)$, $R(1.25, -0.41)$, $S(-1.05, -1.56)$ 。按图 4.2.12 所示迭代性质,可表述为 φD 是 D 的子区域或 $\varphi D \subset D$ 。

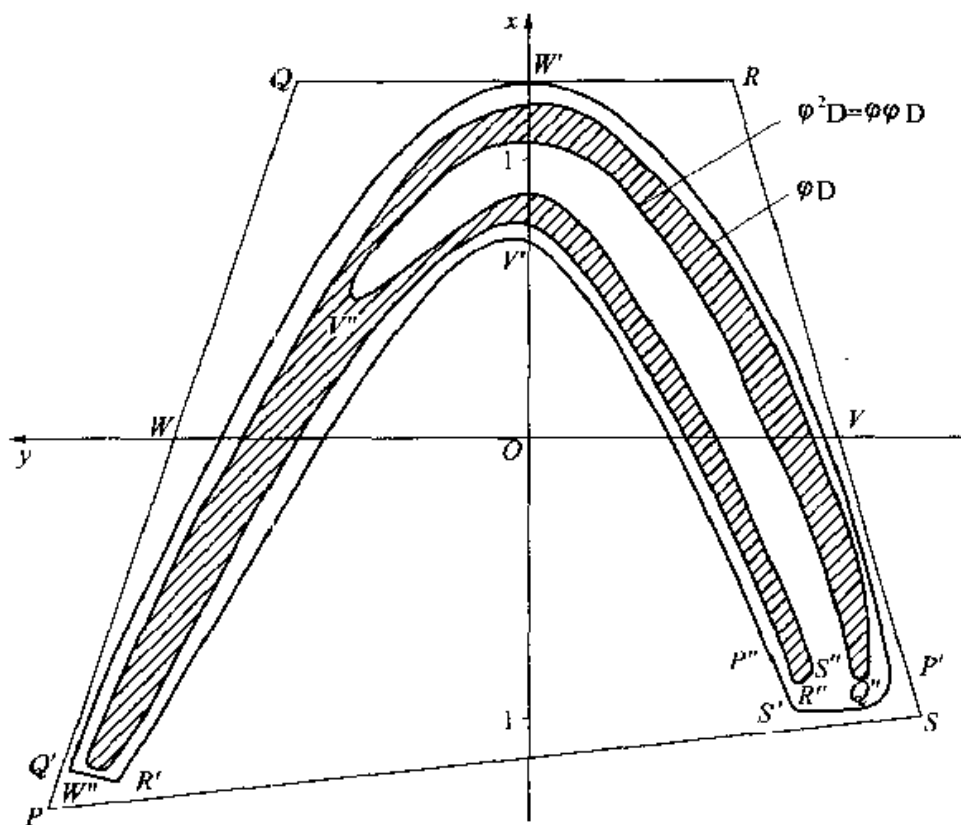


图 4.2.12 非线性迭代的动态行为

同理 $P'Q'R'S'$ 再迭代一次,可得 $P''Q''R''S''$ (参见图 4.2.12 中划阴影线的区域),而且 $P''Q''R''S''$ 也是位于 $P'Q'R'S'$ 之内。照此类推,可得:

$$\dots \subset \varphi^3 D \subset \varphi^2 D \subset \varphi D \subset D \quad (4.2.18)$$

由于 φ 的雅可比矩阵 J 对应的行列式 $\det(J)$, 其值为 -0.3 , 即 φD 的面积是 D 的 0.3 倍, $\varphi^2 D$ 是 φD 的 0.3 倍, 即 D 的 0.09 倍。因此, 经过足够多次迭代后, 这个面积将缩小为任意小的值。这样一来, 初始点落在 D 区域内, 则经过各次迭代后, 这些点将落在 $\varphi D, \varphi^2 D, \dots$ 的范围之内。换句话说, “ D 区域形成一个捕捉区”, 落在其内的点经过迭代后, 将始终落在 D 区域以内的 $\varphi^n D (n \rightarrow \infty)$ 极限区域内。就是说 D 区域中存在一个“吸引子”, 它是 $\varphi^n D$ 当 $n \rightarrow \infty$ 的极限情况下的定态, 吸引子本身应当是 φ 的一个不变集合。不动点 A 也应当包含在 $\varphi^n D$ 之内。因 $\varphi A = A$, A 是不动点但却不是吸引子, 因为它是不稳定的。为了进一步弄清 $\varphi^n D$ 的形状, 将变换 φ 分解成 4 步, 参见图 4.2.13。

- (1) 将 $PQRS$ 拉长并且压扁, 使其面积缩小为原来的 0.3 倍;
- (2) 因 $\det(J)$ 为负, 故将拉长、压扁后的图形翻身;
- (3) 将第 2 步中图形弯成曲边四边形;
- (4) 将曲边四边形放进原四边形区域之内。

图 4.2.13 给出了变换 φ 的 4 步分解, 并最后将 φD 放进 D 之内。为了求图 4.2.12 中的 $\varphi^2 D$, 可以从图 4.2.13 中的最后一个图出发, 再重复以上 1 到 4 步, 其结果便是图 4.2.12 中的 $\varphi^2 D$ (阴影区) 即 $P'Q'R'S''$ 。

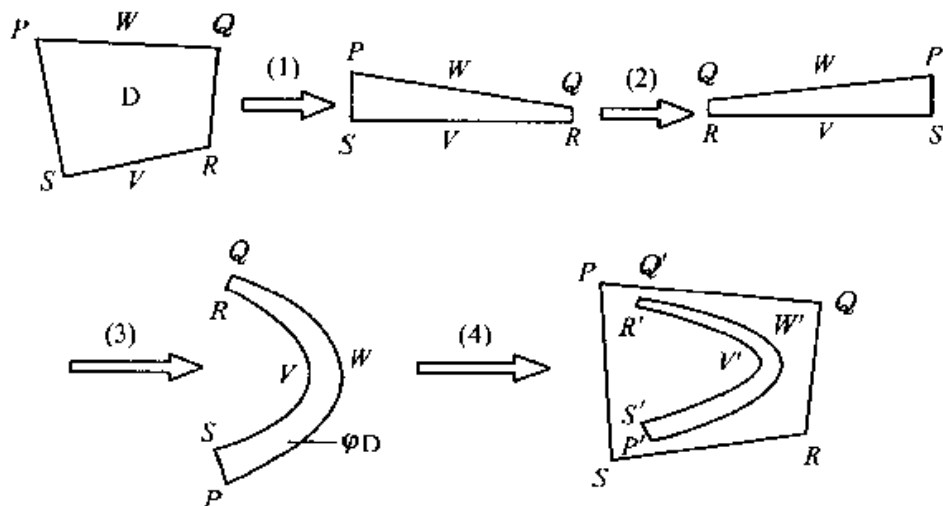
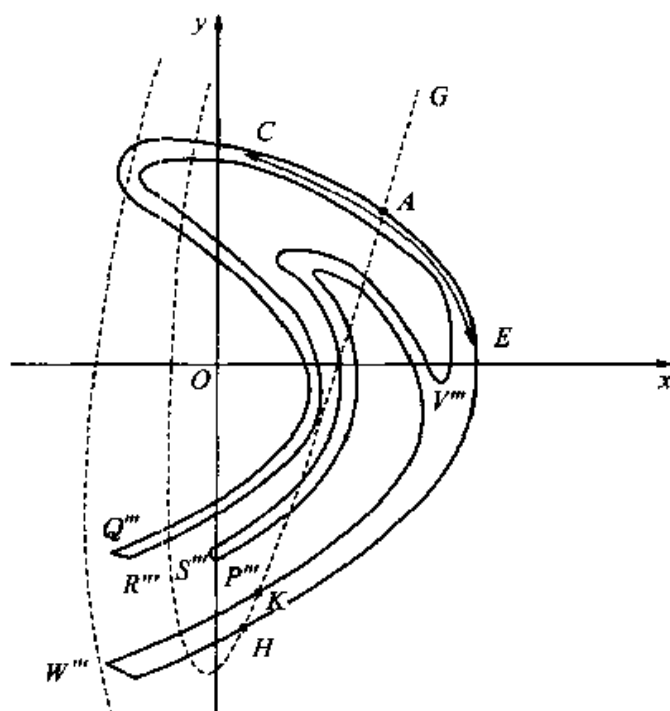


图 4.2.13 揉面变换分解为 4 步

又从图 4.2.12 的 $\varphi^2 D$ 出发, 重复 φ 变换的 4 步, 可得 $\varphi^3 D$, 示于图 4.2.14。从图 4.2.14 可知, $\varphi^3 D$ 比 $\varphi^2 D$ 更窄、更细, 而且明显地由 $\varphi^2 D$ 的 2 股变成 $\varphi^3 D$ 的 4 股。

图 4.2.14 $\varphi^3 D$

变换 φ 有点类似于揉面变换 (kneading transformation)。 $\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi^n D$ 的极限形状, 可以想象为: 它是无限长的, 宽度为零的, 无限次来回迭代的曲线。当然, 人们能够真正给出的 $\varphi^n D$ 曲线, 其 n 总是有限次的, 对于埃农迭代, 有人做过 600 次, 2000 次, 1 万次, 10 万次迭代的结果。迭代 600 次的结果示于图 4.2.15。²

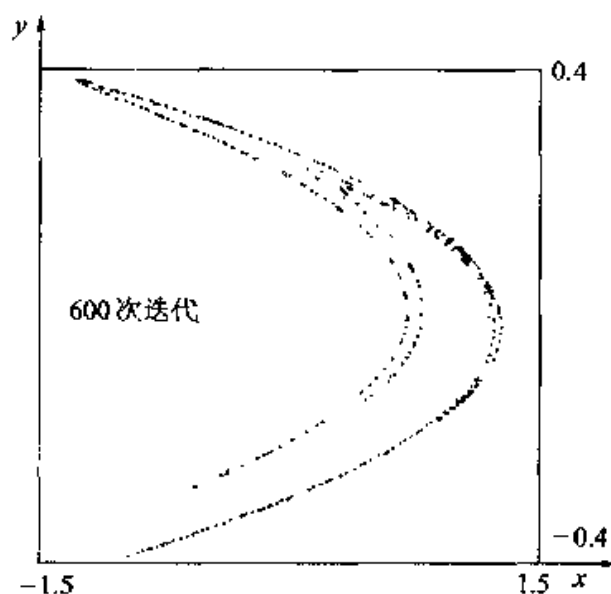


图 4.2.15 埃农方程 600 次迭代的结果

4.2.4 混沌的特征

关于混沌的定义,尚未有统一明确的定义,通常就以下几个特征来加以界定。

4.2.4.1 对初值的敏感性

在图 4.2.16 中, $AB, CD, EF, GH, \dots$ 是一系列均匀排列的平行线段。它们与水平线的倾角为 45° , 而且 $AC = CE = EG = \dots = 1$ 。在 AC 上的初始点 I 作垂线 IJ , 交 AB 于 J ; 并从顶点 J 作等腰三角形, 交水平线于 K ; 再从 K 作垂直线, 交 CD 于 L ; 再以 L 为顶点作等腰三角形, 交水平线于 M 。再由类似方法可得垂线顶点 $N, P, Q, \dots$, 并可得垂直线序列 $x_0 = IJ, x_1 = KL, x_2 = MN, x_3 = OP, \dots$, 这个序列 $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots$ 完全取决于初值 x_0 。如将数 n 看成时间, 上述作图法描述了一个离散动力学系统, 这是 $[0, 1] \rightarrow [0, 1]$ 的一个映射, 并可由下列迭代方程来描述:

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2x_n & 0 \leq x_n < \frac{1}{2} \\ 2x_n - 1 & \frac{1}{2} \leq x_n < 1 \end{cases}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.2.19)$$

说明这一映射实际上是将实数用二进位小数表示, 每次迭代相当于将数左移一位并弃去整数项。于是当初值 $x_0 \in (0, 1)$, 就有以下 3 种情形:

(1) 如果 x_0 为有理数, 且能表示为真分数, 分母为 $2^k, k \in \mathbb{Z}^+$, 这时的二进位表示为有限位小数, 因此, 经过 k 次迭代后变为零, 即 $x_k = 0$, 而且 $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots$ 也全为零。 $x_0 = 11/32$, 故经过 5 次迭代后, $x_5 = 0$, 可以说解是定态, 即 $x_5 = x_6 = x_7 = \dots = 0$ 。

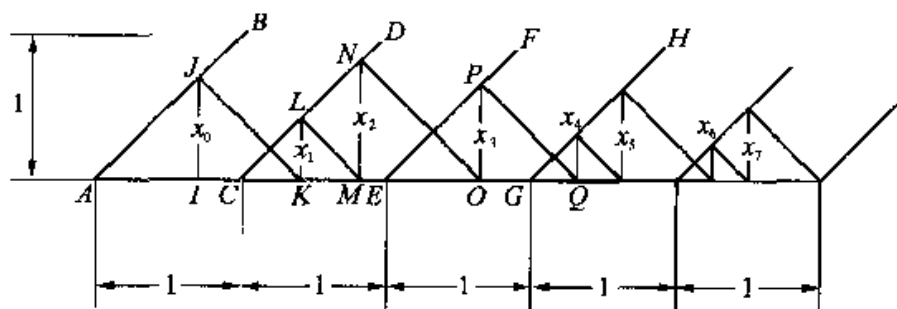


图 4.2.16 初值对 x 序列的影响

(2) 如果 x_0 为有理数, 用真分数表示时, 分母并非 2 的整数次幂, 这时

用二进制表示为循环小数,亦即经有限步之后必进入周期态。例如 $x_0 = \frac{13}{28}$, 则定态是 3 周期解, 即 $\frac{6}{7} \rightarrow \frac{5}{7} \rightarrow \frac{3}{7} \rightarrow \frac{6}{7}$ 。

(3) 如果 x_0 是无理数, 则序列 x_n 既不趋于零, 也不趋于周期解, 结果将是貌似无规则的混沌解, 例如 $x_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 。

下面讨论(4.2.19)对于初值的敏感程度, 设 $x_0 = 13/28$, 则当 $n \geq 2$ 时, $x_{n+3} = x_n$, 例如 $x_{3002} = 6/7, x_{3003} = 5/7, x_{3004} = 3/7, x_{3005} = 6/7$ 。现对 x_0 作小扰动, 设

$$x_0 = \frac{13}{28} \left(1 - \frac{1}{8^{1000}}\right) = \frac{13}{28} \left(\frac{8^{1000} - 1}{8^{1000}}\right)$$

因为 $8^{1000} - 1$ 中有 $(8 - 1) = 7$ 的因子, 所以 x_0 的分母可表示为 2^{3002} , 故对这个初值, 可有

$$x_{3002} = x_{3003} = x_{3004} = x_{3005} = \dots = 0$$

又设初值是上两个 x_0 之间的一个无理数, 例如

$$x_0 = \frac{13}{28} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{8^{1000}}\right)$$

此时解是无规则的混沌, 事实上在 $\frac{13}{28}$ 和 $\frac{13}{28} \left(1 - \frac{1}{8^{1000}}\right)$ 之间有无穷多个有理数和无理数。当 x_0 在这个范围内变化时, 小数点后 900 多位数均不变。但即使这样微小的变化, 却能够造成迭代解显著的不同, 这也是混沌的一种特征。³

4.2.4.2 游荡集

(4.2.19)也可以用图 4.2.17 的两段直线表示, 两直线的斜率都是 2。如开始时初值 x_0 有一小扰动 Δx_0 , 设 $x_0 + \Delta x_0$ 与 x_0 均位于小于 $1/2$ 的同一侧, 则显然迭代一步后 $\Delta x_1 = 2\Delta x_0$, 同理 $\Delta x_2 = 2\Delta x_1 = 2^2\Delta x_0$ 。但当扰动后的值与未扰动值不在 $1/2$ 的同一侧, 那么“迭代 1 次放大 2 倍”不再成立。如图 4.2.17 中 Δx_3 不再是 $2\Delta x_2$ 。这个系统所以发生混沌, 是因为从局部来说, 每一处的特征根 (即斜率) 都是 2, 误差愈放愈大 (普遍意义下的不稳定); 而从全局来说, 整体的运动又不准走出单位正方形。因此, 局部不稳定而又全局受限制, 形象的说法是: 既“跑不出去”又“无处安身”, 于是只好在捕捉区范围之内到处游荡。这就是混沌吸引子形成的原因。

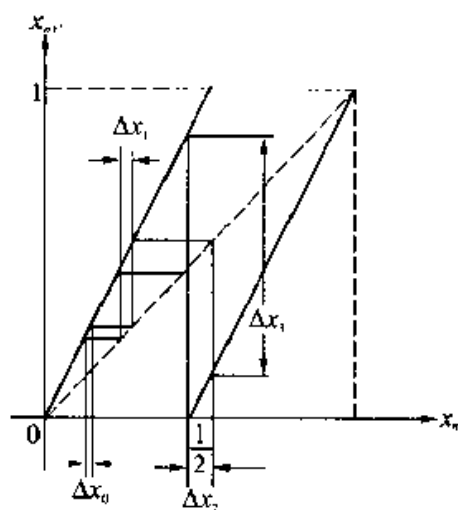


图 4.2.17 迭代点的游荡

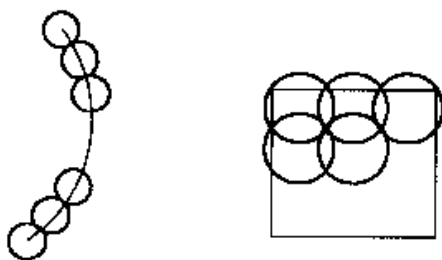
4.2.4.3 非整数维

混沌吸引子具分数维,是分形结构。70 年代发展起来的分形几何是描述非线性现象和非线性系统的一个有力工具,其最基本的概念是分数维,它是我们所熟知的 1 维、2 维、 n 维空间中维数概念的推广。度量分数维的维数公式有很多,常用的分数维是容量维数(capacity dimension),其计算维数的容量维数公式如下:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \left(\frac{1}{\epsilon} \right)} \quad (4.2.20)$$

其中 ϵ 表示覆盖的最大直径, $N(\epsilon)$ 表示所需直径最大为 ϵ 的覆盖集的个数。该容量维数的含义可用下述例子来说明。

【例 4.2.1】图 4.2.18 中 1 维线段设为 1 单位长,现用直径为 ϵ 的球(圆)去覆盖它,设 $\epsilon = 1/10$,则至少要 10 个球才能全部覆盖住,当 ϵ 降为 $1/100$,则 ϵ 球至少要 100 个,我们注意(4.2.20)中 N 代表 ϵ 球的个数。对 1 维线段,可以有 $N \sim (1/\epsilon)^1$,这个幂次 1 就是维数。

图 4.2.18 用直径为 ϵ 的球去覆盖线段与正方形

现用直径为 ϵ 的圆覆盖一个正方形。如将圆的直径改为原来的 $1/10$, 则圆的个数增大到原来的 100 倍, 即 $N \sim (1/\epsilon)^2$, 将此关系代入 (4.2.20), 可得

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \left(\frac{1}{\epsilon} \right)} = 2 \frac{\log \left(\frac{1}{\epsilon} \right)}{\log \left(\frac{1}{\epsilon} \right)} = 2$$

故得正方形是 2 维的。

【例 4.2.2】所谓康托尔集合, 是由一线段中去掉其中间的 $1/3$, 尔后又去掉余下两个线段的中间 $1/3$ 。照此类推, 而最后余下的点集的极限情况, 参看图 4.2.19。现在用直径为 ϵ 的球去覆盖每次余下的线段, 可得表 4.2.3 的数据。

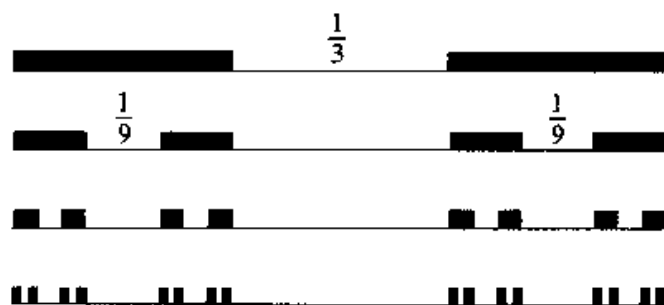


图 4.2.19 康托尔三分集合

表 4.2.3 康托尔集合的 ϵ 和 $N(\epsilon)$

序号 i	1	2	3	...	n
直径 ϵ	$\frac{1}{3}$	$\left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{9}$	$\left(\frac{1}{3}\right)^3 = \frac{1}{27}$	...	$\left(\frac{1}{3}\right)^n$
$N(\epsilon)$ 个数	2	$2^2 = 4$	$2^3 = 8$	...	2^n

设原来线段长为 1 单位, 由表 4.2.3 即得:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \left(\frac{1}{\epsilon} \right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log 2^n}{\log \frac{1}{\left(\frac{1}{3}\right)^n}} = \frac{\log 2}{\log 3} = 0.630\ 91$$

即康托尔集合的容量维数(或简称维数)是 0.630 91。

【例 4.2.3】另一个著名的分维图形是芒德布罗雪花 (Mandelbrot

snowflake)。此图形的形成是对一个正方形的每一边如 AB 分成 4 等分,把中间的两个四分之一向里向外放长成为原长的三边,如 DE 改为 $DCFE$ 。而再将所得每一线段采用类似方法增长其中间两个四分之一,向里向外分形,如此无穷多次重复这个过程,参见图 4.2.20。

设 AB 长为 $\sqrt{2}$,现用边长为 ϵ 的斜置正方形来覆盖 AB 段,可得表 4.2.4 的数据。由表 4.2.4 可得容量维数:

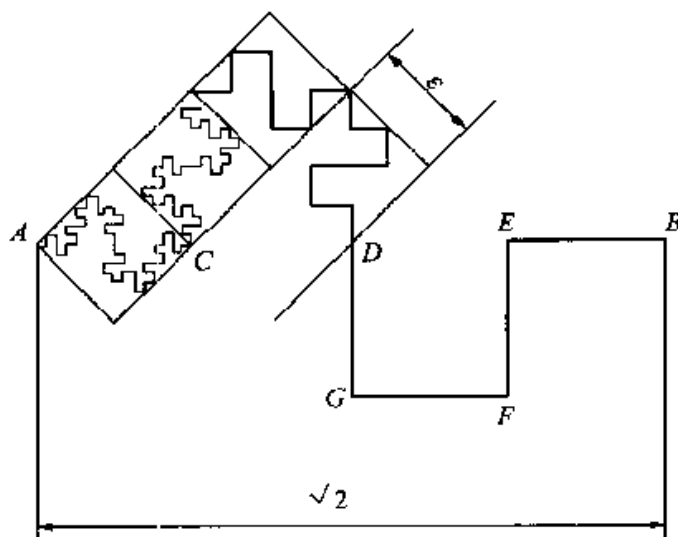


图 4.2.20 芒德布罗雪花的形成

表 4.2.4 芒德布罗雪花的 ϵ 、 N

序号 i	1	2	3	...	n
直径 ϵ	1	$\frac{1}{4}$	$\left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{1}{16}$	...	$\left(\frac{1}{4}\right)^{n-1}$
$N(\epsilon)$ 个数	1	8	$8^2 = 64$	...	8^{n-1}

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \left(\frac{1}{\epsilon} \right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log 8^{n-1}}{\log \frac{1}{\left(\frac{1}{4} \right)^{n-1}}} = \frac{\log 8}{\log 4} = 1.5$$

4.3 几种自动器网络模型

4.3.1 元胞自动机

在自动器网络中,目前研究最多、应用最广的一类是元胞自动机。其特

点可归纳为:

- (1) 各元素分散在离散的晶格点上;
- (2) 各元素的状态随时间离散地变化;
- (3) 每个元素都是完全相同的有限自动器(故称为元胞);
- (4) 每个元胞都只与其周围的元胞局部连接;
- (5) 元胞的状态变化都是由确定性规则表示。

由于现代计算技术的发展,大规模的数学计算与仿真为研究复杂系统的行为提供了非常经济的“实验室”。元胞自动机在近十多年得到很大发展,大多数新的成果都是建立在高强度仿真试验基础之上的,下面简单介绍一些与我们讨论一般系统的动态行为有关的结果。

从原则上讲,元胞自动机可以是任意维的,但最常见的两种元胞自动机是1维和2维的。在1维元胞自动机中,最常见的连接方式是每个元胞与周围 $2r+1$ 个元胞(包括它自己)相连。在2维元胞自动机中最常见的连接方式是冯·诺伊曼连接与穆尔(Moore)连接,其每个元胞只与其冯·诺伊曼和穆尔邻域中的元胞相连。1维和2维元胞自动机如图4.3.1所示。

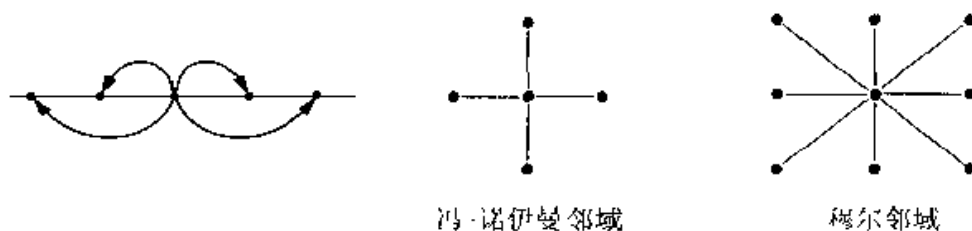


图 4.3.1 1 维和 2 维元胞连接方式

元胞自动机的状态取决于元胞的数量、连接方式和每个元胞可取的值。这里我们遇到一个典型的组合爆炸问题。假设一元胞自动机中每个元胞存在 k 种状态,每个元胞与它周围 n 个元胞(包括它自己)相连,则它的邻域存在 k^n 种状态。元胞的输出函数或称自动机的转变函数要将 k^n 种状态映射为 k 状态的一种,则共有 $k^{(k^n)}$ 种状态函数存在。假设一元胞自动机中,每个元胞存在 10 种状态($k=10$),元胞以冯·诺伊曼方式连接($n=5$),则共有 $k^{(k^n)} = 10^{(10^5)} = 10^{100000}$ 种转换函数!

研究结果表明⁴,在所有这些规则中,较简单的几种规则,如可加规则(additive rules),总和规则(totalistic rules),压迫规则(forcing rules)和可逆规则(reversible rules)等容易分析。特别是总和规则,它规定每个元胞的状态,只

与其邻域元胞状态之和有关。非常重要的一点就是,沃尔弗拉姆(S. Wolfram)证明,总和规则描述的自动机展现所有元胞自动机可能表现的动态行为,而这些行为可以用类似于连续动态系统中的吸引子来表示。换言之,元胞自动机的整体行为可以用吸引子来表示。

沃尔弗拉姆详细研究了元胞自动机的演化行为,并将它们按其结构性地分为下面四大类,即元胞自动机的稳态行为(如某些“基因”形式的定期再现)只能是下述几类之一:

第一类:均匀状态,即点吸引子;

第二类:简单的周期性结构,即周期吸引子;

第三类:混沌的非周期性模式,即混沌吸引子;

第四类:具有某种局部结构的复杂模式(连续系统中没有对应的模式)。

从研究元胞自动机的角度讲,最有研究价值的是第四类行为,因为这类元胞自动机被认为具有涌现计算(emergent computation)功能,可以用作通用计算机(universal computer)来仿真复杂的计算过程⁵。而我们所关心的是这类自动器网络作为一类系统的动态模型确实能反映所描述的系统的状态和演化过程。

以1维元胞自动机为例,我们观察它作为一个系统的整体行为。假设1维元胞自动机的单元在 t 时刻的状态为 $a_i(t)$,每个元胞与周围 $2r+1$ 个元胞(包括它自己)相连,即它与那些相距不超过 r 的元胞相连,则总和规则定义了该自动机的转换函数 f ,使

$$a_i(t) = f\left(\sum_{j=-r}^r a_{i+j}(t-1)\right), \quad 0 < i, j < N \quad (4.3.1)$$

其中 i, j, r, t 及 $a_i(t)$ 均取整数,且 $a_0(t) = a_n(t)$, $a_{-1}(t) = a_{n-1}(t)$,即该自动机具有循环的边界;每个元胞的取值为 $a_i(t) \in \{0, 1, \dots, k-1\}$ 。若令 $k=2$, $r=2$,则共有64种总和规则,其中两种可以表示如下(表4.3.1):即规则24由 $f(5)=0$, $f(4)=1$, $f(3)=1$, $f(2)=0$, $f(1)=0$, $f(0)=0$ 所规定。例如下述几种规则描述的元胞自动机可按上述归纳法归类(取 $k=2, r=2$):

第一类吸引了: 规则4(000100)

第二类吸引子: 规则40(101000)

第三类吸引子: 规则28(011100)

第四类复杂模式:规则52(110100)

表 4.3.1 64 种总和规则中的两种

$\sum_{j=-r}^r a_{i+j}(t-1)$ 规则代码						
	11110 11101 11011 10111 11111 01111					00000
	5	4	3	2	1	0
24	0	1	1	0	0	0
52	1	1	0	0	0	0

这四种规则所导出的元胞自动机的时空行为如图 4.3.2 所示(其初始条件是:每个元胞以 1/2 的概率取值为 1 或 0)。

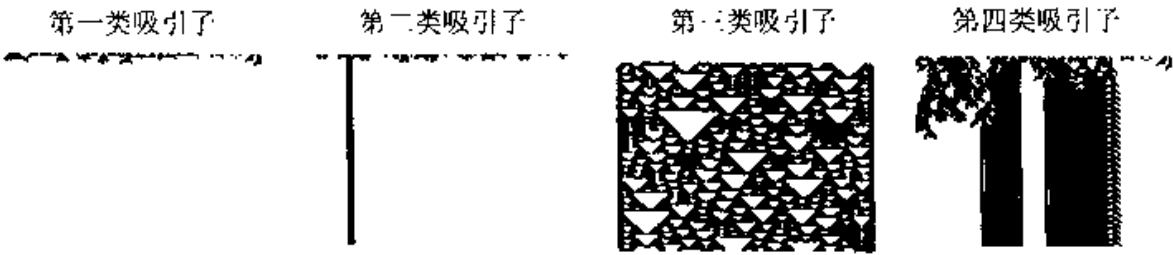


图 4.3.2 几类不同吸引子

沃尔弗拉姆还近似地给出了几种 1 维元胞自动机中各类吸引子或模式所占的比例(表 4.3.2)。可以看出,具有一定局部结构的复杂模式出现的概率相对要小些。

表 4.3.2 1 维元胞自动机中各类吸引子所占比例

吸引子类型	$k=2$ $r=1$	$k=2$ $r=2$	$k=2$ $r=3$	$k=3$ $r=4$
	0.50	0.25	0.09	0.12
2	0.25	0.16	0.11	0.19
3	0.25	0.53	0.73	0.60
4	0.00	0.06	0.06	0.07

兰顿(C. Langton)定义了一个关于转换函数的参量,从而将元胞自动机的函数空间参量化。该参量变化时,元胞自动机可展现不同的动态行为,得到与连续动态系统中相图相类似的参量空间,兰顿的方法如下⁶。

首先定义元胞的静态(quiescent state),元胞的静态具有这样的特征,如

果元胞所有邻域都处于静态,则该元胞在下一时刻将仍处于这种静态(类似于映射中的不动点)。现考虑一元胞自动机,每个元胞具有 k 种状态(状态集为 Σ),每个元胞与 n 个相邻元胞相连。则共存在 k^n 种邻域状态。选择 k 种状态中任意一种 $s \in \Sigma$ 并称之为静态 s_q ,假设对转换函数集 Δ 而言,共有 n_q 种变换将邻域映射为该静态,剩下的 $k^n - n_q$ 种状态被随机地、均匀地映射为 $\Sigma - s_q$ 中的每一个状态,则可定义:

$$\lambda = \frac{k^n - n_q}{k^n}, \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (4.3.2)$$

这样,对任意一个转换函数,定义了一个对应的参量值 λ 。随着参量 λ 由 0 到 1 的变化,元胞自动机的行为可从点吸引子变化到周期吸引子,并通过第四类复杂模式达到混沌吸引子。在上面定义的参量空间中,元胞自动机的动态行为(定性)具有点吸引子 $\rightarrow$ 周期吸引子 $\rightarrow$ “复杂模式” $\rightarrow$ 混沌吸引了这样的演化模式。

元胞自动机作为一种离散的动态模型,广泛地应用于生命现象的模拟中。目前正在兴起的一门学科称为人工生命(artificial life)。它从理论上研究生命可能存在的方式,而传统生物学只研究生命的可以观察到的方式⁷。人工生命研究所使用的方法,主要是像元胞自动机这类的动态模型,在这一类模型中,局部的相互作用可以带来系统整体的涌现行为,如宏观吸引子的产生、信息储存、结构稳定、在时空中演化等。人工生命研究最著名的成果之一,就是兰顿在 2 维元胞自动机中发现的一个能自我复制的“圈”或称“能自我复制的元胞自动机”。这是一个以冯·诺伊曼方式连接的 2 维元胞自动机,每个元胞的状态在 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 中取值(图 4.3.3)。经过若干迭代后,系统演化到下面的状态,即一个新的圈被复制(图 4.3.4)。若用 $\boxed{n}$ 表示一自复制的圈,则该系统的生长繁殖过程可以用图 4.3.5 来表示。

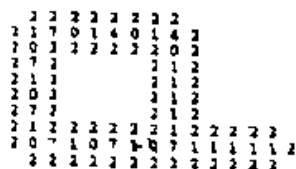


图 4.3.3 2 维元胞自动机中
一个能自我复制的圈

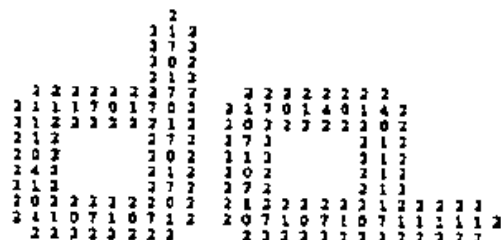


图 4.3.4 一个新的复制圈

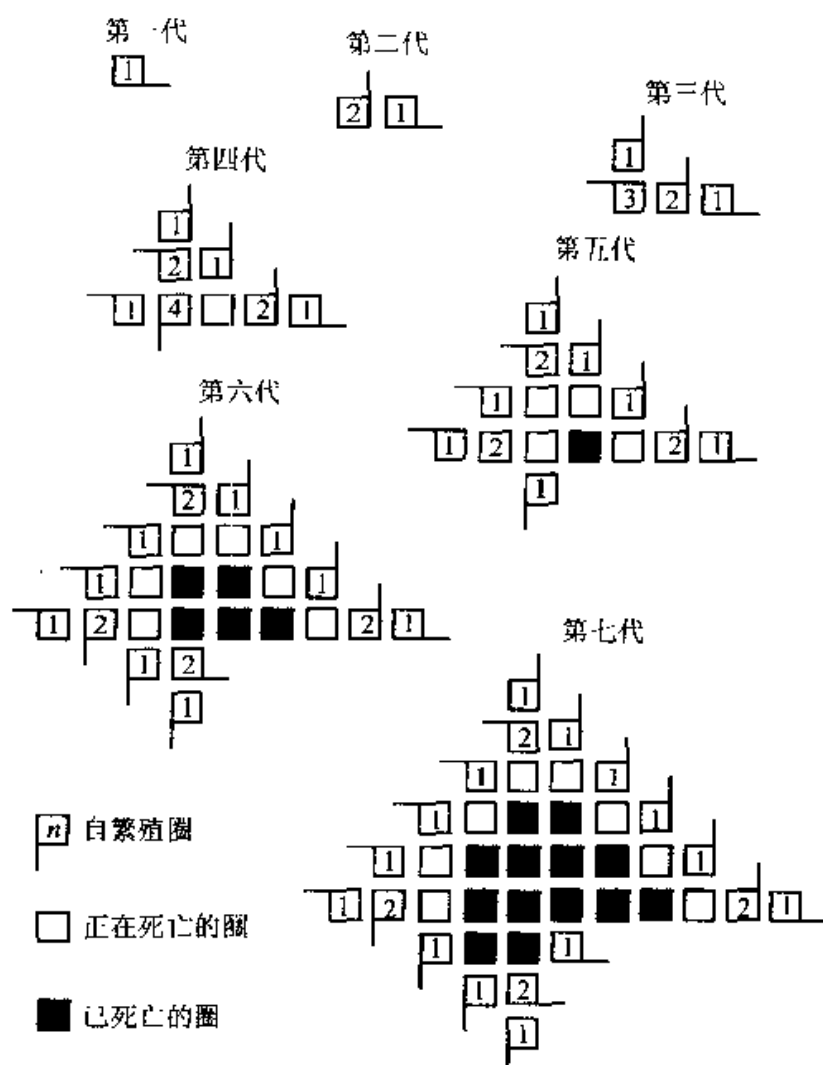


图 4.3.5 一个自繁殖圈的生长过程

4.3.2 布尔网络

布尔网络是一类特殊的 2 维元胞自动器,其每个元胞都是布尔自动器,即每个元胞状态为 0 与 1,当元素的连接是随机的且每个自动器的转换函数也是随机确定的时候,我们就得到随机布尔网络。

研究表明,随机布尔网络也表现出比较复杂的涌现行为,网络作为一个整体,可以用吸引子描述,即吸引子定义整个系统的状态。考夫曼(S. Kauffman)证明⁸,在具有 n 个自动器单元,每个单元与 k 个自动器相连时,随机布尔格中存在的吸引子数量与 k, n 有如下关系。

表 4.3.3 吸引子数量与 k, n 的关系

连接度	$k = n$	$k > 5$	$k = 2$	$k = 1$
吸引子数	$\frac{n}{e}$	$\frac{\log\left(\frac{1}{\frac{1}{2} \pm \alpha}\right)}{n^{\frac{1}{2}}}$	$\sqrt{n}$	指数的 n

其中: $\alpha = \frac{1}{2} + 2^{-(2^k+1)} \left(\frac{2^k}{2^{k-1}} \right) \circ$

当 $k > 5$ 时, 系统大多数时候呈混沌状态, 即吸引子大多为混沌吸引子。 $k = 2$ 时, 系统存在点吸引子和周期吸引子。 因而整个系统处于一种比较有序的状态。

【例 4.3.1】 给出了一个简单的布尔网络及其演化过程(见图 4.3.6、4.3.7 和真值表 4.3.4、时间行为表 4.3.5)。 轨道相图及吸引子见图 4.3.7。

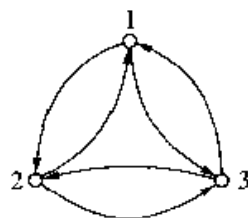


图 4.3.6 布尔网络

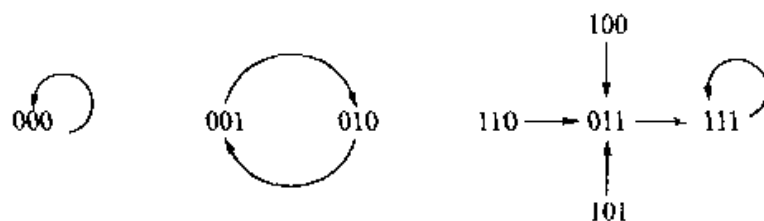


图 4.3.7 系统的 3 种状态及时变路径

表 4.3.4 真值表(每个结点的转移函数)

2	3	1	1	3	2	1	2	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

结点 1 AND(与门)

结点 2 OR(或门)

结点 3 AND(与门)

当结点 2 由 OR(或门)变为 AND(与门)时, 该网络有不同的轨道(见图 4.3.8)。

表 4.3.5 时间行为

时刻 t			时刻 $t+1$		
1	2	3	1	2	3
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1

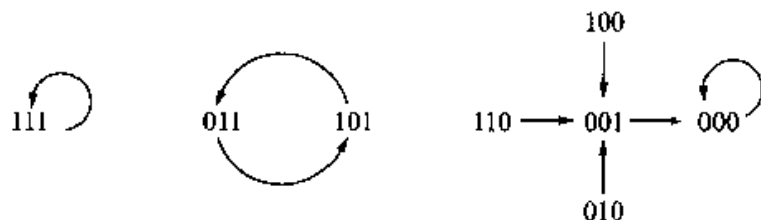


图 4.3.8 节点 2 状态函数由“或门”变为“与门”时系统的状态及时变路径

考夫曼的工作表明, $k=2$ 的随机布尔网络有着非常有趣的性质:

- (1) 系统存在的吸引子数 $\sqrt{N}$ 大大低于系统的元素数量;
- (2) 大多数吸引子的长度都比较低(即周期吸引子的周期较小);
- (3) 大多数吸引子都是稳定的, 它们能抗拒对系统的微小扰动。

这样, 一个随机布尔网络作为一个动态系统, 其状态可以由数量大大低于其元素个数的有限个吸引子表示。因而随机布尔网络可以用来描述一类元素很大, 但每个元素只有两种状态, 元素局部连接的系统的宏观整体行为。最明显的一个例子就是生物体中基因所构成的一个网络。考虑生物体中基因的作用关系, 假设每个基因都可以得到表达或得不到表达(相当于开或关), 从而可视为布尔自动器; 每个基因只与另外两个基因相互作用, 则 $k=2$ 的随机布尔网络可以用以表示生物体中基因控制系统。⁹ 两类之间可建立如下对应关系:

- (1) 吸引子的大小对应着基因表达方式对某种细胞类型的限制;
- (2) 吸引子的数量对应生物体中细胞的种类;

- (3) 吸引子的稳定性对应细胞的内稳态特性;
- (4) 扰动后可达的吸引子数量对应着细胞分化后产生的细胞数量;
- (5) 吸引子的基因行为模式的交叉对应一个生物体中细胞间的相似程度;
- (6) 通过变异改变吸引子种类对应新型细胞的进化。

4.3.3 神经网络

人工神经网络模型是一种以生物体的神经系统工作原理为基础建立的一种网络模型。该网络中的基本单元是一种类似于生物神经元的人工神经元,也是一种广义的自动机(可以用电子元件模拟);由许许多多类似的人工神经元经一定的方式连接起来形成的网络,表现出系统的整体性行为。这种涌现行为表现为神经网络可以被用来作为信息处理的一个功能整体,正是由于神经网络具有很强的信息处理功能,它目前已被广泛应用于与信息处理有关的一切领域,包括简单的信号处理分析到研究人的学习记忆机制。在此,我们只按照 4.1.2 节所提出的概念框架,介绍神经网络作为描述动态系统的一种网络模型所表现的性质。

神经网络的单元是一种特殊的自动器,它的输入和输出关系可以表示如图 4.3.9(该神经元记作 i),其中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 是从别的单元输入的信号,它们分别是相应单元的激活值。 ω_{ik} 是神经元 i 与 k 之间的连接强度。函数 f 是将神经元 i 的输入总和转换为输出的映射:

$$y_i = f\left(\sum_k \omega_{ik} x_k + \theta_i\right) \quad (4.3.3)$$

其中 θ_i 是临界值(或称阈值)。

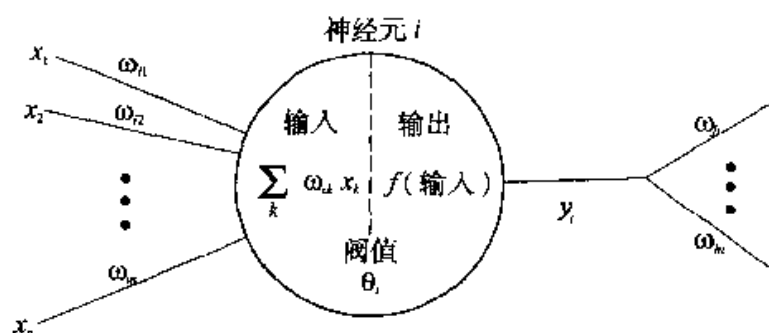


图 4.3.9 神经元作为一自动器的输入输出关系

该神经元的激活值将作为别的神经元的输入。神经元的取值可以是离散的,此时 f 为阶跃函数(取值 0 和 1 或 $-1, +1$),也可以是连续的,取值在

(0,1)之间,通常被称为广义 S 形函数(sigmoid function)(连续、可导、单调递增、有界),最常使用的 S 形函数是:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.3.4)$$

神经网络的结构,即神经元间的连接方式取决于不同的问题要求,但应用最广泛的是一类被称为前馈神经网络。同一层次间的元素不相连,但每一个元素都与上一层次的元素完全或部分相连。我们对神经网络的动态行为可以分三个层次进行描述:

(1) 每个神经元的状态变化。当网络的结构固定,且各神经元之间的连接强度不变时,神经元的状态由描述该系统的确定性方程确定。对神经元状态的描述,可以是离散的(差分方程),也可以是连续的(微分方程)。神经网络在这一层次可体现丰富的动力学行为,存在包括混沌吸引子在内的所有吸引子。但当神经网络用作信息处理工具时,常常由一点吸引子描述。

(2) 神经元间的连接强度随时间变化。系统在这一层次的动态行为可被称为连接强度动力学或权重动力学(weight dynamics)。这是神经网络中学习算法要研究的内容。在大多数情况下,连接强度收敛于点吸引子。但也有研究表明,这个层次上也存在振荡和混沌行为,即连接强度表现为周期吸引子和混沌吸引子。

(3) 最高层次的动力学是网络的结构动力学即网络的连接方式也随时间变化,甚至网络中的神经元数量也发生改变。神经元的应用研究中,往往可涉及到前两个层次的动态行为,目前对第三层次上的动态行为研究较少。

对神经网络动态行为的描述,一般都要根据它的具体结构而定。最一般的方式就是建立单个神经元的(微分或差分)动态方程。然后将所有神经元的动态方程联立,就得到描述系统的方程组。由于转换函数 f 的非线性,神经元间的连接可以极其复杂,所以对神经元数量在 4 个以上的网络,很难得到关于其动态行为的一般结果(如吸引子类型、演化路径等)。科恩(M. A. Cohen)等得到了一类神经网络的行为可以由下述方程描述¹⁰。

$$\frac{dx_i}{dt} = a_i(x_i) \left[b_i(x_i) - \sum_{j=1}^n C_{ij} d_j(x_j) \right] \quad (4.3.5)$$

当满足下列条件时

$$(1) C_{ij} = C_{ji} \text{ (对称性)}$$

(2) $a_i(x_i) \geq 0$ (非负性)

(3) $d_j'(x_j) \geq 0$ (单调性)

则存在一全局李雅普诺夫函数

$$V = - \sum_{i=1}^n \int_0^{x_i} b_i(\xi_i) d_i'(\xi_i) d\xi_i + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^n C_{jk} d_j(x_j) d_k(x_k) \quad (4.3.6)$$

可以由此证明该系统存在全局的点吸引子(而且常常存在多个点吸引子)。科恩还证明,只要对称性条件(1)不满足,即将 $C = C_{ij}$ 换成 $C = C_{ij} + \varepsilon$,则该系统将由点吸引子变为周期吸引子。

值得注意的是,这一科恩-格罗斯伯格(Cohen-Grossberg)一般模型,不但包括了许多描述不同神经网络的特殊模型,而且还包括了分析不同层次上的其他系统的模型。根据科恩-格罗斯伯格方程中 $a_i(x_i)$ 、 $b_i(x_i)$ 、 $d_j(x_j)$ 的不同形式,它还可以给出描述生物学中人口动态演化的洛特卡-沃尔泰拉模型

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i (1 - \sum_{j=1}^n B_{ij} x_j) \quad (4.3.7)$$

以及分析大分子演化中超循环过程的艾根-舒斯特(Eigen-Schuster)模型

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i (A_i x_i^{p-1} - q \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j^p) \quad (4.3.8)$$

这样,科恩-格罗斯伯格模型描述了一大类具有竞争与合作形式的动态系统。如著名的范德波尔方程可用于研究只有2个神经元的网络。这类只有几个神经元的网络里,很容易利用连续动态方程的结果,描述其动态行为和演化过程。已有一系列的研究成果表明这类网络可以表现为各类吸引子¹¹。当神经元的数量较大(>10)时,分析系统的行为很困难。从理论上讲,它们的行为仍然可以用四类吸引子描述,克拉克(J. W. Clark)在大于40维的系统中(神经元数大于40)找到了各类吸引子(包括混沌吸引子)便说明了这一点。¹²

上面关于神经网络的动态行为,都只局限于第一个动力学层次。对连接强度变化的研究,应当结合针对某一问题训练神经网络所使用的学习方法。神经网络最吸引人的地方在于它的信息处理功能。虽然每个神经元状态只受局部条件的约束,但整个系统作为一个宏观整体,却具有记忆、学习和适应等功能。但研究网络的状态时,连接强度可作为可变参数,这些参数的变化将导致系统的结构失稳,从而引出复杂的分岔现象。在这里,动态系

统理论中所常用的稳定性和分岔分析,只对比较小的神经网络实用。

4.3.4 L-系统

L-系统是一种用迭代方式描述动态(生长)过程的方法。它由荷兰数学家林登迈尔(A. Lindenmayer)为描述和模拟植物的生长而创立¹³。L-系统的方法,是按照生物体生长发育的机制而设计的。按照现代生物学的观点,生物的生长发育是由细胞中包含的遗传基因信息决定的;基因信息(基因型)决定生物体的最终的形态(表型)。生长发育的过程中,每个细胞的行为和形状取决于哪段基因信息得到表达,而后者取决于周围细胞中哪些基因信息得到表达。

根据上述原则建立的L-系统,与前述元胞自动机和神经网络的共同点在于,决定系统行为的法则都是局部的,每个单元的行为只与其周围单元行为有关。但系统作为许多单元的集合体都表现出一定的宏观功能和形态,即整体是具有鲜明的涌现特征的吸引子。不同的是,系统的元素数量总在不断增加。

确定L-系统按单元行为及其与周边单元状态间联系程度,又分为“与上下文无关”(context free)的L-系统和与“上下文有关”(context sensitive)的L-系统。若各单元的行为只受重写规则(rewriting rules)规定,只与它上一时刻状态有关而与周边单元无关,则称之为“与上下文无关”,反之,若其状态变化还与其周围单元状态有关,则系统为“与上下文有关”。大多数系统都与上下文有关。下面给出几个L-系统的例子:

【例4.3.2】 假设某一L-系统由下面的重写规则决定

1) $a \rightarrow cb$; 2) $b \rightarrow a$; 3) $c \rightarrow da$; 4) $d \rightarrow c$

其中 a, b, c, d 代表元素的状态。

则给定系统的初始状态 a (或称为给定一种子元素 a), 该生长过程可表述如表4.3.6所示。

表 4.3.6 生长过程表

时间	结构	使用的规则
0	a	种子元素(初始状态)
1	cb	规则 1
2	daa	规则 3, 2
3	$ccbcb$	规则 4, 1, 1
4	$dadaadaa$	规则 3, 3, 2, 3, 2

【例 4.3.3】再看另一 OL-系统, OL-系统是 L 系统中的一类特殊系统, 只是引入了分枝(branching)的概念(用“()”表示向左边分枝, “[]”表示向右边分枝):

1) $a \rightarrow c[b]d$; 2) $b \rightarrow a$; 3) $c \rightarrow c$; 4) $d \rightarrow c(e)a$; 5) $e \rightarrow d$
生长过程如表 4.3.7 所示, 用 2 维图表示如图 4.3.10。

表 4.3.7 生长过程表

时间	结构	使用的规则
0	a	种子元素(初始状态)
1	$c[b]d$	规则 1
2	$c[a]c(e)a$	规则 3, 2, 4
3	$c[c[b]d]c(d)c[b]d$	规则 3, 1, 3, 5, 1

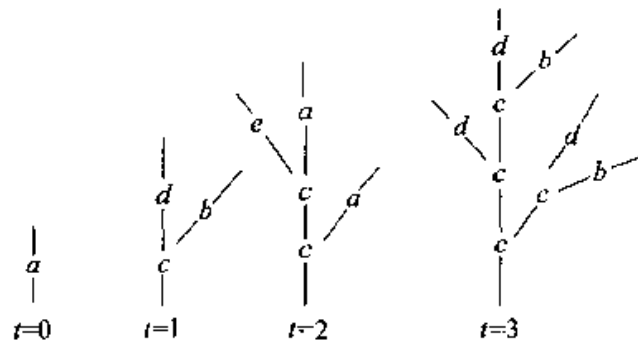


图 4.3.10 生长过程树

以上两个 L-系统都是与周边无关(与上下文无关)的例子, 下面给出一个与上下文有关的 L-系统。

【例 4.3.4】“|”表示括号中的元素将改变状态; “[”, “]”分别表示左边界和右边界, 规则如下:

- 1) $[\{ c \} \rightarrow c$ 若 c 在最左边, 则其状态不变
- 2) $c | c \rightarrow c$ 若 c 的左边有一个 c , 则其状态不变
- 3) $* | c \rightarrow *$ 若 c 的左边有一个 $*$, 则 c 变为 $*$
- 4) $\{ * \} c \rightarrow c$ 若 $*$ 的右边有一个 c , 则 $*$ 变为 c
- 5) $\{ * \}] \rightarrow *$ 若 $*$ 在最右边, 则状态不变

按上述规则, 一个初始态为 $* ccccccc$ 的结构最终将变为 $ccccccc *$, 如表 4.3.8 所示。

表 4.3.8 结构变化

时间	结构
0	* ccccccc
1	c * ccccccc
2	cc * ccccccc
3	ccc * ccccccc
4	cccc * ccccccc
5	ccccc * ccccccc
6	cccccc * ccccccc
7	ccccccc * ccccccc

上面介绍的只是最简单的 L-系统。比较复杂的 L-系统已被成功地用于描述植物的生长、分维图形的产生和图象生成等¹³。有关分形生长的几幅图[取自普鲁辛凯维奇 (P. Prusinkiewicz) 的书], 示于图 4.3.11。

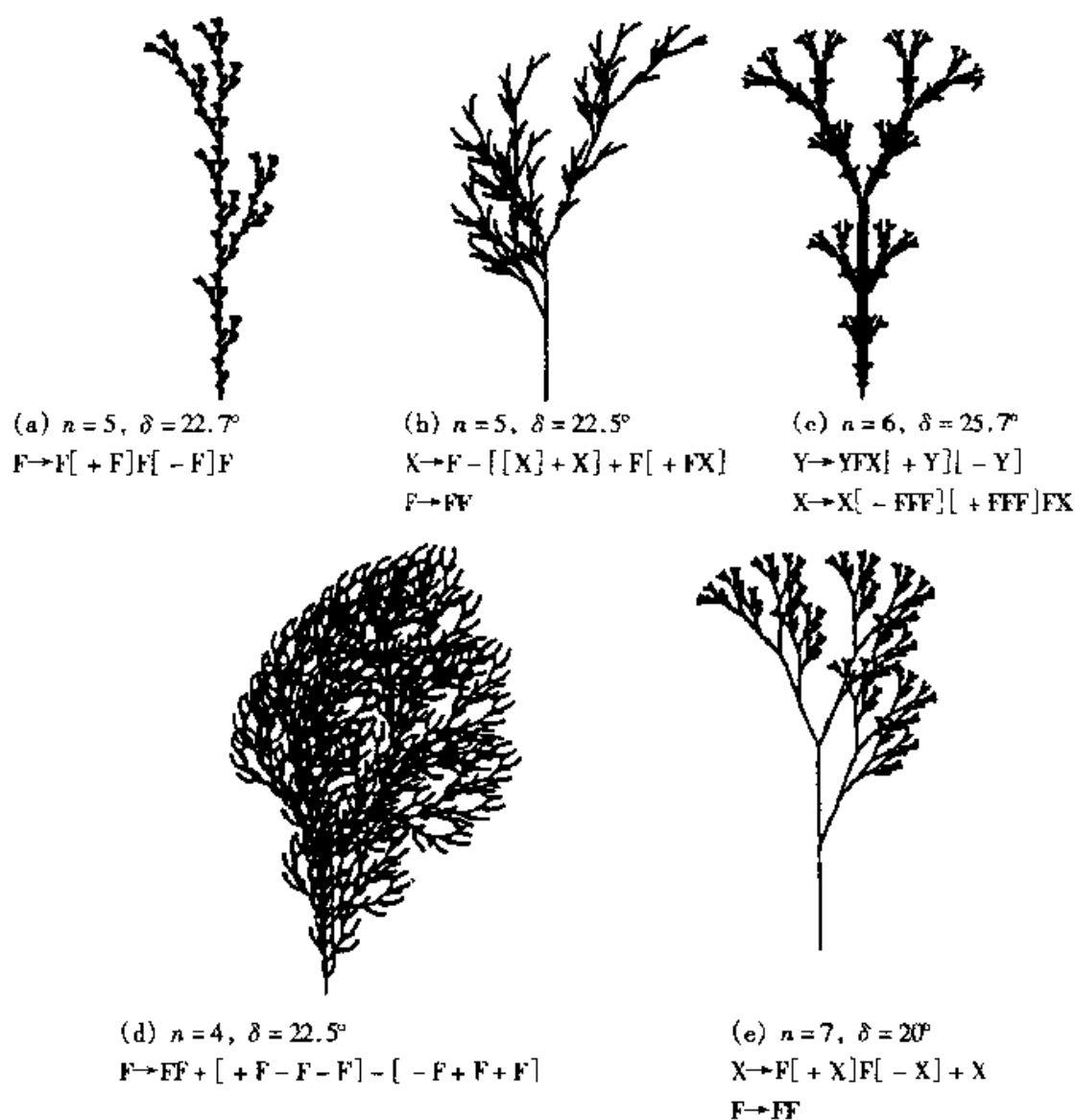


图 4.3.11 分形生长树图

4.4 遗传算法

遗传算法是一种模拟生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,由霍兰提出,其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换,搜索不依赖于梯度信息。在实现机制上,它又是一种离散动力学系统,在给定初始群体和遗传操作的前提下,通过迭代实现群体的进化。它尤其适用于处理传统搜索方法难于解决的复杂和非线性问题,可广泛用于组合优化、机器学习、自适应控制、规划设计和人工生命等领域。

4.4.1 遗传算法的基本概念

遗传算法研究的目的,一是抽取和解释自然系统的自适应过程,二是设计具有自然系统机理的人工系统。1975年,霍兰在《自然系统与人工系统中的适应性》一书中,正式提出遗传算法的概念和理论框架。当前,遗传算法与进化策略、进化程序设计共同构成了“进化计算”的主干,而且它们之间的边界也被打破了。

遗传算法是一种由一个“染色体群”通过“自然选择”的机制转化成另一个“染色体群”的方法。在这里,“自然选择”是由遗传学中“选择”、“交换”和“突变”几种作用共同完成的。“染色体”是由“基因”组成的,“基因”是指用一位二进制代码(0或1)表示的一个遗传因子,则染色体是用二进制字符串表示的。选择作用从染色群体中选出可以繁殖后代的染色体。平均来说,适应性强的染色体比适应性弱的染色体产生出更多的后代。交换作用用于交换两个染色体的组成部分,实际上是粗略地模仿两个单倍体(只有一个染色体的有机物)的再结合。突变作用随机地改变染色体上某一位置的遗传因子的值。

为什么进化的思想能给解决计算问题带来启示呢?许多计算问题需要搜索巨大的可能性空间。比如在合成蛋白质的工程中,需要一种算法能够将大量氨基酸组合成具有某一特殊性质的蛋白质。进化实际上是在大量的可能选择中寻找解决方案的一种方法。生物学中“大量的可能选择”是指可能的基因序列的集合,而解决方案是指具有高度适应性的有机体——能够在环境中很好的生存和繁衍的有机体。当然有机体的适应性包括很多因素,如对物理条件的忍耐程度如何,同周围其他有机体的竞争与合作如何等等。适应度的指标值随着有机体的演化而不断变化,因此,进化的过程是在不断变化的可能性中寻找答案。计算机程序对适应性的要求也可以大致描

述为在变化的条件下搜索解决问题的方案。此外,进化还是一种大规模的并行作用,不是一次作用于一个物种,而是同时作用于多个物种。从一个较高的层次来看,进化的“规则”是相当简单的:物种在自然选择(通过交换、突变和其他方式)的作用下不断进化,适应性越强的物种越容易生存和繁衍,并将适应环境的基因物质复制给后代,对生物界的观察表明,这些简单的规则的确能够代表进化的过程。

生物遗传物质的主要载体是染色体,DNA 是其中最主要的遗传物质,而基因又是控制生物性状的功能和结构单位。偶数个基因组成染色体,染色体中的基因位置称作基因座,而基因所取的值又叫做等位基因。基因和基因座决定了染色体的特征,也就决定了生物个体的性状。此外,染色体有两种相应的表示模式,即基因型和表型。所谓表型是指生物个体所表现出来的性状,而基因型指与表型密切相关的基因组成。同一种基因型的生物个体在不同的环境条件下,可以有不同的表型,因此表型是基因型与环境条件相互作用的结果。

在遗传算法中,染色体对应的是数据或数组,在标准遗传算法中,通常是由一维的串结构数据来表现的。串上的各个位置对应上述的基因座,而各个位置上所取的值对应上述的等位基因。遗传算法处理的是染色体,或叫基因型个体。一定数量的个体组成了群体,也叫集团。群体中个体的数目称为群体的大小,也叫群体规模。而各个体对环境的适应程度叫做适应度。此外,遗传算法的执行包含两个必须的数据转换操作,一个是表型到基因型的转换,另一个是基因型到表型的转换。前者是把搜索空间中的参数或解转换成遗传空间中的染色体或个体,此过程又叫做编码操作;后者是前者的一个相反操作,叫做译码操作。

每个染色体可以看作搜索空间中的一个点,代表了一个候选解。遗传算法对染色体群进行处理,不断地用一个新的染色体群替换原来的染色体群,也就是不断地尝试新的候选解。为检验候选解的可行性,需要一个适应度函数来检查每一个候选解的适应性。这个函数给出每一个候选解的适应性的度量,也就是这个候选解对于所给定问题的有效性的度量。

下面说明一下适应度函数的含义。遗传算法常用于寻找函数的极值,目的是对于一个给定的函数,寻找一组参数使得函数取得极大值或极小值(在多参数函数的情况下,遗传算法对于寻找极值是很有效的),举个简单的例子,假设有一个一元函数:

$$f(x) = x + |\sin(32x)|, \quad 0 \leq x \leq \pi \quad (4.4.1)$$

需要求得 $f(x)$ 的极大值。这时, 候选解是 x 的取值, 可以用一个二进制串表示 x 的取值。适应度函数将二进制串转化成真实的数字值并代入 $f(x)$ 中, 该候选解的适应度就是将 x 代入的结果, 因此结果越大, 意味着更加接近与函数的极值。候选解可以采取不同的符号编码成符号串, 而适应度函数是定义在所有可能符号串所代表的域上的。遗传算法就是在该域上适应度函数搜索具有最大值的符号串。

4.4.2 遗传算法的实现

遗传算法是一种群体型操作, 该操作以群体中的所有个体为对象。最简单的遗传算法中包括三种遗传操作: 选择(selection)、交换(crossover)和突变(mutation)。

(1) 选择操作 这一操作从染色体群中选择某些染色体用于繁殖后代(生成新的候选解), 染色体的适应度越高, 它被选中的概率就越大。

(2) 交换操作 这一操作随机地选定一个位置, 将两个染色体在该位置上交叉互换, 得到两个后代。例如, 两个染色体分别为 10000100 和 11111111, 随机选定的位置是第三位, 进行交换的结果是 10011111 和 11100100。交换操作粗略地模拟了两个单倍体生物进行繁殖时染色体的配对过程。

(3) 突变操作 这一操作随机改变染色体中某一位置上的遗传因子的值。例如, 二进制串 01000100 在第二位上发生突变, 变成 00000100。突变可能发生在符号串的任意位上。通常发生突变的概率很小。

假设给定了一个问题, 并且用定义好的长度为 m 的染色体串代表候选解, 遗传算法的流程可以简单地描述为:

步骤 1: 随机生成 n 个长度为 m 的染色体串, 形成初始的染色体群。

步骤 2: 将染色体群中每个染色体串代入适应度函数, 计算适应度。

步骤 3: 判断是否满足终止条件, 若是, 则适应度值最大的染色体对应的候选解就是需要的满意解; 若否, 则转步骤 4。

步骤 4: 重复下列步骤直至产生了 n 个后代。

a) 在当前的染色体群中随机选取两个染色体作为父体, 选取染色体的概率函数应该是适应度的增函数。在选取父体的过程中, 一个染色体可以被多次选中。

b) 对于选中的父体, 按照概率 P_c (称为交换概率) 决定是否交换产生

两个新的后代,发生交换的位置是随机的,每个位置的概率是相同的。如果不发生交换,则两个后代是对两个选中的父体进行严格复制的结果,注意这里定义的交换是两个父体在一个随机的位置上进行交换。在遗传算法中有时会用到多点的交换,即在多个随机的点上发生交换。

c) 对于产生的两个后代,分别在每个位置上按照概率 P_m (称为突变概率) 发生突变。将两个后代放入新的染色体群。

d) 如果 n 是奇数,可以随机地放弃一个新的后代。

步骤 5: 生成 n 个新的染色体后,用新的染色体群代替原来的染色体群。

步骤 6: 转向步骤 2。

每次迭代这一过程称为一个世代。一个遗传算法的应用通常需要迭代 50 ~ 500 个世代,可以指定迭代的世代数作为算法的终止条件。显然,遗传算法具有一般离散动力学系统的一般特征。

所有世代的集合称为一族。迭代的最后结果中经常可以找到一个或多个具有较高适应度的染色体。但由于在每一族中随机性发挥了很大的作用,则如果两族使用的随机种子发生器不同,则迭代的结果在细节上会有所区别。遗传算法的研究经常会报告对于同一个问题的不同族的统计数字,诸如在一族中找到的最高适应度是多少,在第几个世代中找到具有最高适应度的个体等问题。

上述简单模型只是描述了大多数遗传算法所共有的基本步骤,仍有许多细节尚未涉及,例如初始染色体群中染色体的个数、交换概率、突变概率的取值应该是多少等等,而遗传算法用于特定问题的成功与否往往取决于这些细节。这里所介绍的是最为普通的遗传算法模型。下面举一个例子说明这一模型。

【例 4.4.1】 假设染色体二进制串的长度为 8,适应度函数 $f(x)$ 等于二进制串中 1 的个数(这是一个相当简单的适应度函数,只是为了举例说明而已)。染色体群中染色体的个数 $n=4$,交换概率 $P_c=0.7$,突变概率 $P_m=0.001$ (注意突变概率很小,在生物界中发生突变的可能性的确也很小),在遗传算法的实际应用中,染色体二进制串的长度和染色体的个数 n 可能会远远大于这个例子中的值,通常分布在 50 ~ 1000 之间。

(随机产生的)初始群体可能是这样的(表 4.4.1):

表 4.4.1 初始染色体

染色体标号	二进制串	适应度
<i>A</i>	00000110	2
<i>B</i>	11011110	6
<i>C</i>	00100000	1
<i>D</i>	00110100	3

遗传算法中进行选择操作时通常使用一种称为“适应度比例选取”的方法。在这种方法下,每个个体都有可能被选中用来繁殖后代,该个体被选中次数的数学期望值等于它的适应度与群体的平均适应度的比值。这与生物学中所称的生存选择是一致的。

有一种简单的方法可以实现按适应度比例的选取,想象有一个赌博的轮盘,每个染色体根据其适应度与群体适应度总和的比值在轮盘上划分一块区域,而后随机地掷骰子,骰子所停下的那个区域的染色体就是被选中的染色体。可以证明,在多次掷骰子的情况下,每个染色体被选中的次数正好接近于按适应度比例的选取。在本例子中, $n=4$ 的情况下,每一个世代中需要掷4次骰子,假设第一次选中进行繁殖的染色体是*B*和*D*;第二次选中的染色体是*B*和*C*。一旦选择操作完成,选出了两个染色体作为父体繁殖后代,下一步将依照交换概率决定是否交换产生后代。如果不发生交换现象,则两个后代是两个父体的严格复制。假设在这个例子中,选中父体*B*和*D*进行交换,交换的位置在第1位,于是得到两个后代 $E=10110100$ 和 $F=01101110$;选中父体*B*和*C*不发生交换,则产生的后代与*B*和*C*完全相同,于是得到了4个新的染色体。再下一步,每个新的染色体的每个位置上按照突变概率决定是否发生突变,假设后代*E*在第6位上发生突变,得到 $E'=10110000$,后代*F*和*C*不发生突变,后代*B*在第1位发生突变,得到 $B'=01101110$ 。此时,完成了一个世代,得到了新的染色体(表4.4.2):

表 4.4.2 新的染色体

染色体标号	二进制串	适应度
E'	10110000	3
<i>F</i>	01101110	5
<i>C</i>	00100000	1
B'	01101110	5

注意在新的染色体群中,尽管最大适应度比原来有所降低(6降为5),但平均适应度提高了(由3升为3.5)。将这一过程反复执行下去,最终会得到一个编码全都是1的后代。

遗传算法是解决搜索问题的一种通用算法,对于各种搜索问题都可以使用。搜索算法的共同特征是:(1)首先生成一组候选解;(2)依据某些适应性条件测算这些候选解的适应度;(3)根据适应度决定保留某些候选解,放弃其他的候选解;(4)对保留的候选解进行某些操作,生成新的候选解。遗传算法中上述几个特征以一种特殊的方式组合在一起:基于染色体群的并行搜索,带有猜测性质的选择操作、交换操作和突变操作。这种特殊的组合方式将遗传算法与其他搜索算法区别开来。

遗传算法除了具有以下离散动力学系统的一般特点,还有以下几方面的特点:

(1) 遗传算法的处理对象不是参数本身,而是对参数集进行了编码的个体。此操作使得遗传算法可直接对结构对象进行操作。

(2) 许多传统搜索方法都是单点搜索算法,容易陷入局部的最优解。遗传算法同时处理群体中的多个个体,即对搜索空间中的多个解进行评估,减少了陷入局部最优解的风险,同时算法本身易于实现并行化。

(3) 遗传算法基本上不用搜索空间的知识或其他辅助信息,而仅用适应度函数值来评估个体,在此基础上进行遗传操作。适应度函数不仅不受连续可微的约束,而且其定义域可以任意设定。这一特点使遗传算法的应用范围大大扩展。

(4) 遗传算法不是采用确定性规则,而是采用概率的变迁规则来指导它的搜索方向。

(5) 具有自组织、自适应和自学习性。遗传算法利用进化过程获得的信息自行组织搜索,适应度大的个体具有较高的生存概率,并获得更适应环境的基因结构。

前面所描述的遗传算法的模型非常简单,但是在这一基本型上加以改进后,遗传算法在科学和工程领域得到了广泛的应用。下面列举了一些遗传算法的应用领域:

优化:遗传算法可以用于各种优化问题。既包括数量优化的问题,也包括其他的组合优化问题,例如线路设计、任务调度等。

程序设计:遗传算法可以用于某些特殊任务的计算机程序设计,如元胞

自动机等。

机器学习:遗传算法可以用于许多机器学习的应用,包括分类问题和预测问题等,例如预测天气或预测蛋白质的结构。

经济学:应用遗传算法可以对经济创新的过程建立模型,可以研究投标的策略,还可以建立市场竞争的模型。

免疫系统:应用遗传算法可以对自然界中免疫系统的多个方面建立模型,研究个体的生命过程中的突变现象以及发掘进化过程中的基因资源。

生态学:遗传算法可以应用于对生态学的一些现象进行建模,包括生物间的生存竞争,宿主-寄生物的共同进化,共生现象,甚至包括生物学“军备竞赛”。

进化现象和学习现象:遗传算法可以用来研究个体是如何学习生存技巧的,一个物种的进化对其他物种会产生何种影响等等。

社会经济问题:遗传算法可以用来研究社会系统中的各种演化现象,例如在一个多主体系统(multiagent systems)中,协作与交流的现象是如何演化出来的。

4.4.3 模式定理和积木假说

遗传算法的解通常是由若干部分组成的,每个部分可以看作一个“积木(building block)”,从概括的角度,遗传算法的工作机制可以描述为通过不断发掘、强化以及组合那些好积木从而得到问题的解。这里隐含着一个思想,即好的解是由好的积木组成的。霍兰使用了一个专门的名词“模式”(schemes)来代表那些积木,一个模式是指一组可以用由0、1和通配符*组成的模板来描述的二进制串。例如,模式 $H = 1 * * * * 1$ 代表了所有长度为6、起始位和终止位是1的二进制串,可以想象一个长度为 n 的模式代表了 n 维空间中的一个超平面。一个符合模式的二进制串称为它的一个实例,100001和101011都是 H 的实例。模式中非通配符的位(定义位)的个数称为该模式的秩,例如 $H = 1 * * * * 1$ 的秩为2。霍兰还使用了“定义长度”这一术语来表示一个模式中两个定义位之间的最大距离。

遗传算法是如何处理模式的呢?任一给定长度为 n 的二进制串都可以是 2^n 个不同模式的实例,例如11是模式 $* *$ (所有长度为2的二进制串)、 $* 1$ 、 $1 *$ 和 11 (这个模式的唯一实例就是11)的实例。因此,对于

任何一个染色体群,它所包含的 m 个染色体将是 k 个模式的实例,满足 $2^n \leq k \leq m \times 2^n$ 。如果染色体群中的所有染色体都是相同的,则它们是 2^n 个模式的实例,否则模式的数目将大于等于 2^n 而小于等于 $m \times 2^n$ 。这意味着,对于一个给定的世代,当遗传算法逐个测算每个染色体的适应度时,它实际上是在隐式地估算许多模式的适应度,这里一个模式的适应度是指它的所有实例的平均适应度,例如,随机地生成 n 个二进制串,其中约有一半将是模式 $1 * * * \dots *$ 的实例,另一半将是模式 $0 * * * \dots *$ 的实例,对这样的约 $n/2$ 个模式 $1 * * * \dots *$ 的实例进行测算,可以大致估算出该模式的平均适应度,由于这 $n/2$ 个实例只是取自该模式所有实例的一个很小的样本,因此对平均适应度只能做一个估算,正如遗传算法中没有显式地使用和评测模式一样,遗传算法中也没有显式地计算和保存模式的平均适应度。但是,从下面的介绍中可以看到,遗传算法实际上是利用计算和存储某些模式的平均适应度来决定是增加该种模式的实例还是减少其实例。

对于某一模式的实例数的增减变动,可以进行这样的估算。假设 H 是一个模式,在 t 时刻染色体群中至少有 H 的一个实例。设 $m(H, t)$ 表示 t 时刻 H 的实例数, $\mu(H, t)$ 是在 t 时刻模式 H 的平均适应度(染色体群中模式 H 的实例的适应度的平均值),估算的目标是 $E(m(H, t+1))$,即在 $t+1$ 时刻染色体群中模式 H 的实例数的期望值。再假设选择操作采用的是前面介绍过的方式,染色体 x 的后代的期望值等于 $f(x)/\bar{f}(t)$,其中 $f(x)$ 是 x 的适应度,而 $\bar{f}(t)$ 是 t 时刻整个染色体群的平均适应度。于是,假设在 t 时刻染色体在染色体群中,用 x 表示 x 是 H 的一个实例,如果暂时忽略交换和突变作用,可以得到

$$\begin{aligned} E(m(H, t+1)) &= f(x)/\bar{f}(t) \\ &= \frac{\mu(H, t)}{\bar{f}(t)} m(H, t) \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

这一公式能够成立是因为对于 t 时刻染色体群中的所有 x ,有

$$\mu(H, t) = \frac{\sum_{x \in H} f(x)}{m(H, t)} \quad (4.4.3)$$

因此,尽管遗传算法没有显式地计算 $\mu(H, t)$,但实际上染色体群中某一模式的实例的数量是依赖于 $\mu(H, t)$ 的。

交换和突变作用可能创造出 H 的新的实例,但也可能破坏原有的实例。现在,假设只考虑交换作用和突变作用的破坏效果——减少 H 的实例

数量。考虑到这一破坏效果后,需要修改(4.4.2)的右端以给出 $E(m(H, t+1))$ 的下界,当交换概率为 P_c 时,假设模式 H 的一个实例选中产生子代。在单点交换的条件下,如果其中有一个子代仍然是模式 H 的实例,则称模式 H “存活”了下来,用 $S_c(H)$ 表示 H 在交换作用下存活的概率,可以给出 $S_c(H)$ 的下界:

$$S_c(H) \geq 1 - P_c \frac{d(H)}{n-1} \quad (4.4.4)$$

这里 $d(H)$ 是模式 H 的定义长度,而 n 是搜索空间中的二进制串的长度。(4.4.4) 的含义是,只有发生在定义长度内的交换作用才有可能破坏模式 H ,再将其乘上交换率 P_c 就得到模式 H 被破坏的概率的上界。(因为某些发生在定义长度内的交换作用并不破坏模式,例如两个完全相同的串发生交换时产生的后代与父代时一样。)再用 1 减去这个值就得到了 $S_c(H)$ 的下界,简言之,在交换作用下,越短的模式越容易存活下来。

突变作用的破坏效果可以用如下方式来计量:当突变概率为 P_m 时,用 $S_m(H)$ 表示 H 在突变作用下存活的概率,则有

$$S_m(H) = (1 - P_m)^{O(H)} \quad (4.4.5)$$

这里 $O(H)$ 是 H 的秩(定义位的个数)。(4.4.5) 的含义是,对于每一个二进制位来说,不发生突变的概率是 $1 - P_m$,则对于所有的定义位来说,都不发生突变的概率是 $1 - P_m$,自乘 $O(H)$ 次。简言之,在突变作用下秩越低的模式越容易存活下来。

将(4.4.4)和(4.4.5)用于修正(4.4.2),得到:

$$E(m(H, t+1)) \geq \frac{u(H, t)}{\bar{f}(t)} m(H, t) \left[1 - P_c \frac{d(H)}{n-1} \right] [(1 - P_m)^{O(H)}] \quad (4.4.6)$$

这就是著名的霍兰模式定理。它描述了一个模式从一个世代到下一个世代的成长过程。这一定理经常被解释为:短的、低秩的模式平均适应度将大于整体的平均适应度,其样本的数量(即实例的数量)也将呈指数增长。(4.4.6) 所阐述的模式定理只给出了下界,因为它只处理了交换作用与突变作用的破坏效果。但实际上,交换作用被认为是遗传算法的主要力量来源,因为正是交换作用使得“好的”模式的实例能够结合成同样好的或更好的模式的实例。因此,遗传算法工作方式的此种假说被称作积木假说。

在计算染色体群中 n 个染色体的适应度时,遗传算法隐式地估算了该

染色体群所代表的模式的平均适应度,并根据模式定理增加或减少该模式的实例。这种同时对染色体群中的大量模式进行隐式评测被称为“隐式并行作用”,选择作用的效果就是使那些估算的适应度高于整体的平均适应度的模式逐渐被优选来产生新的样本(后代)。从原理上讲,随着时间推移,对模式的平均适应度的估算应该越来越精确,因为,遗传算法从该模式中取得越来越多的样本实例。

4.4.4 遗传算法的实例

遗传算法主要被应用在两类领域来解决问题:作为一种方法来解决各种技术问题和作为一种简单的科学模型来回答有关自然科学和社会科学的问题。下面将介绍遗传算法的一个实例,解释遗传算法与传统搜索算法的区别。

【例 4.4.1】“移梵塔”问题

所有学习过计算机算法的人都知道“移梵塔”问题,所谓梵塔是指按照由大到小的顺序依次叠放的 n 个圆柱体(塔片),问题是:有标号为 1、2 和 3 的三个位置,要求将位置 1 上的整个梵塔移动到位置 3 上,在移动的过程中,一次只能移动一个塔片,并且要求移动时,始终遵守梵塔叠放塔片的顺序要求,即半径小的塔片叠放在半径大的塔片上。对于 $n=3$ 的情况,最少步数的移动过程如图 4.4.1 所示。

经过上述步骤后,梵塔从位置 1 全部移动到了位置 3 上。这实际上是一种递归算法,其思想是将问题逐步分解,得到一些基本问题,解决这些基本问题后,再将它们综合起来。因此,不难完成这一算法的程序(MoveTower 函数)。这里执行移动塔片操作的算法不是由程序自己搜索得到的,而是由程序设计者给出的,即事先决定的。下面介绍的是应用遗传算法解决移梵塔问题的示例。此时,遗传算法的目的是找出移动塔片的过程。在对问题的解所知甚少的情下,遗传算法显示了它的魅力。

对于移动 n 个塔片的梵塔问题,可以证明所需的有效步数是 $2^n - 1$ (从 MoveTower 函数可看出)。在移动过程中的任一状态下,下一步所采取的移动方式有 6 种可能,标号表示如表 4.4.3。

考虑到限制条件(半径小的塔片叠放在半径大的塔片之上),这 6 种移动方式不可能都是被允许的,需要检测移动的有效性。因此,可以将每一步移动编码为一个遗传因子,用其标号表示,遗传算法的染色体可以编码为一个 6 进制串,长度为 $2^n - 1$,表示从初始状态开始进行 $2^n - 1$ 次“移动”——

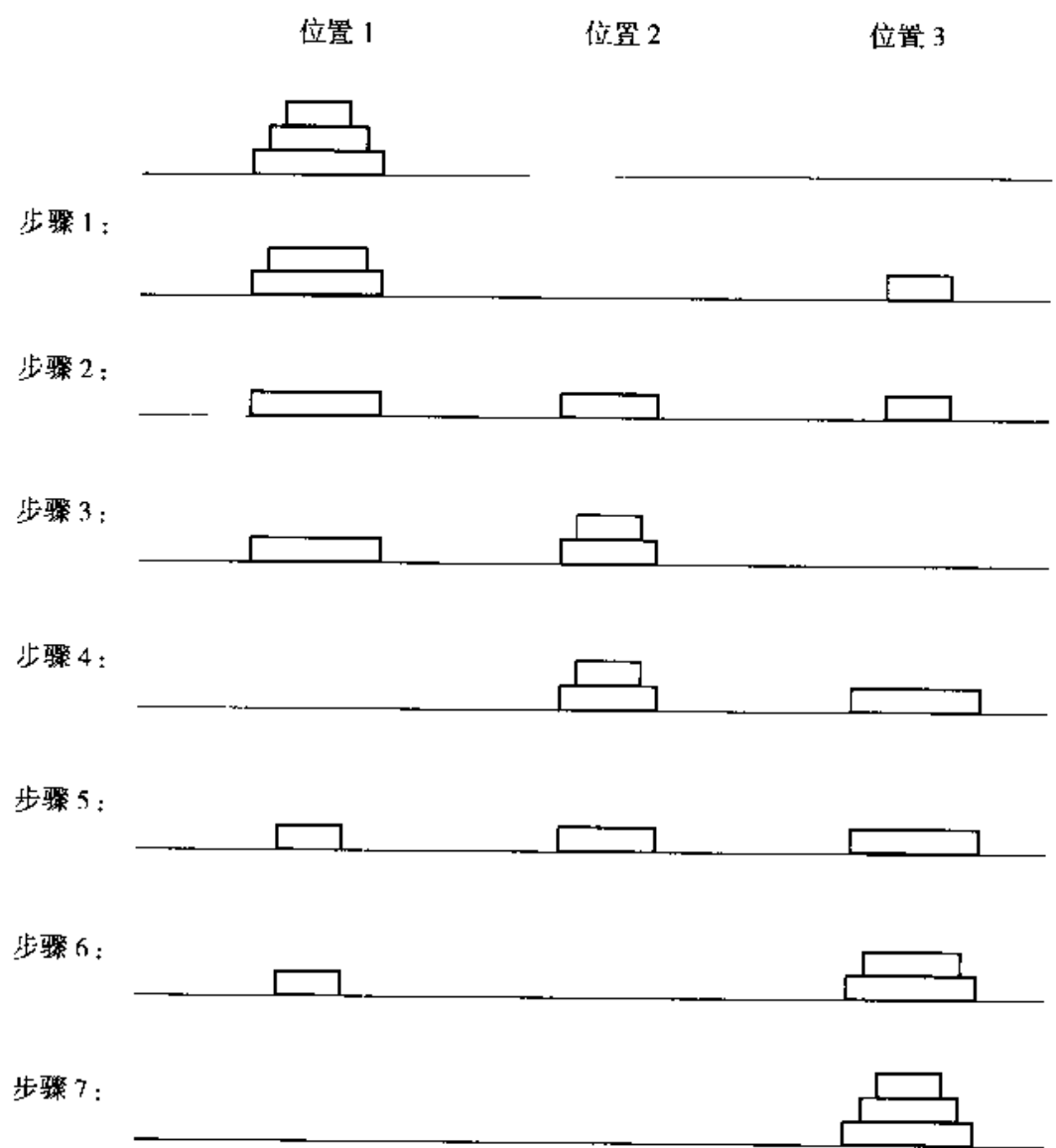


图 4.4.1 梵塔的移动过程

表 4.4.3 6 种可能的移动方式

原始位置(标号)	移动到目标位置	移动方式
1	2	NO. 0
1	3	NO. 1
2	3	NO. 2
3	2	NO. 3
4	1	NO. 4
2	1	NO. 5

可能实际的移动步数没有这么多,如果移动完后得到终止状态,说明这个染色体代表的候选解就是真正的解。例如, $n=3$ 时,编码 0130420 代表了问题的解。这样,得到一个大小为 $6^{2^n}-1$ 的搜索空间。随着 n 的增长,搜索空间将急剧膨胀。

实际上,在完全不知道解的情况时,染色体编码的长度足够长,以保证能够正确表示一个完整的移动过程。在设计算法时,将编码定长为 2^n-1 是为了简化程序设计,否则,需要将编码定为足够长的 k ,然后在检验这个染色体时判断经过了每一步移动后(一次检测每个 6 进制位)是否已经达到了终止状态,这样做只是增加了程序量,对于算法的本质没有影响,因此在这里可以做这种简化。

如何给出移梵塔问题的适应度函数呢?一种较为直观的想法就是判断对于一个候选解来说,执行了全部的移动步骤后,在目标位置上叠放的塔片,叠放的塔片越多、塔片的半径越大,说明适应度越高。由此,设 n 个塔片的半径分别为 $1, 2, \dots, n$; 将三个塔位每个看作有 n 层,用 $r_{ij} (i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, n)$ 表示叠放在第 j 个塔位的第 i 层的塔片的半径。

$n=3$ 时,由 r_{ij} 构成的矩阵 R 是:

$$R_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

矩阵 R 称为状态矩阵。对于任一候选解 x ,依照它对梵塔进行移动后得到状态的适应度定义的矩阵 R 称为 x 的结果矩阵。 x 的适应度定义为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n r_{i3}$$

即 x 的结果矩阵的第 3 列元素之和(如果目标位置是 3)。

确定了适应度函数后,只需要给出 P_c (交换概率)、 P_m (突变概率)、染色体群的大小就可以执行遗传算法了。给出 $P_c=0.7, P_m=0.01$,染色体群的大小=500,执行这一算法 20 次,得到如表 4.4.4 的结果。

$n=3$ 时,算法执行取得了好的结果,在 30 个世代内,大多数族都找到了正确的解。各个世代中染色体群的最大适应度和平均适应度的变化情况,见图 4.4.2。

这是一次典型的算法执行过程的图示,分析图 4.4.2 可以发现,染色体群的最大适应度始终是 6,而平均适应度从一开始的 0.994 逐渐上升到接近

表 4.4.4 执行遗传算法的结果

族数(运行次数)	是否找到解	第一次找到解的世代数
1	是	13
2	是	6
3	是	13
4	是	5
5	是	6
6	是	
7	是	28
8	是	10
9	是	9
10	是	
11	是	
12	是	6
13	是	28
14	是	7
15	是	23

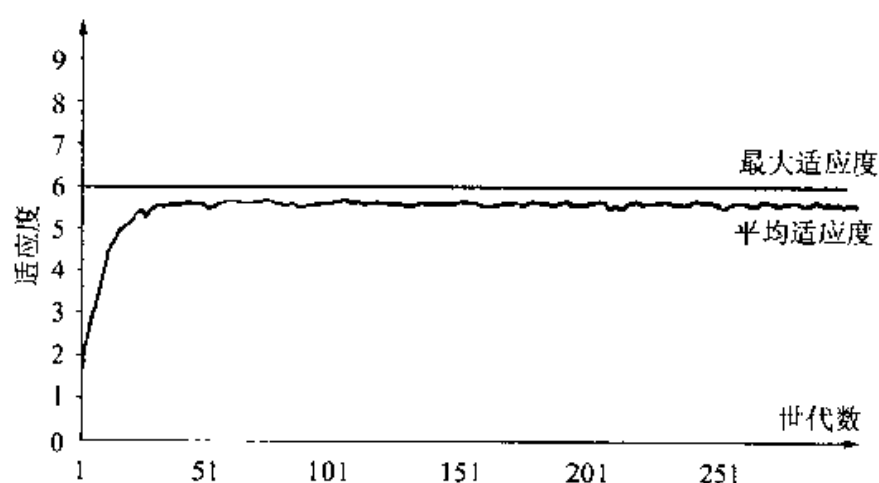


图 4.4.2 最大适应度和平均适应度的变化情况

6 后就基本保持不变。对于适应度函数 $f(x) = \sum_{i=1}^n r_{i3}$, 适应度为 6 的含义是, 移动之后半径为 3、2 和 1 的塔片被依次叠放在了目标位置上。初始世代的平均适应度较低, 但是很快增大。这是因为初始世代中随机生成的候选解是低效率的, 经过交换作用后, 具有较高适应度的候选解可以优先繁殖

后代,于是平均适应度很快上升,由于有突变作用,所以平均适应度与最高适应度之间存在一定的差距(否则平均适应度将趋于最高适应度)。如果用霍兰的理论进行解释,这是因为缺少“好”积木的缘故。因此,解决问题需要从两方面着手,一是提高初始染色体群的有效性,二是适当增加突变率,以增大出现这一积木的可能性。为提高初始染色体群的有效性,可以采取两个措施:(1) 通过增大出现染色体群中染色体的数量,使得初始染色体中包含“好”积木的可能性增大;(2) 通过随机生成初始染色体群时加以一定的检验,使得生成的染色体更为有效。

按照遗传算法理论,如果希望具有某一种积木的候选解能够产生较多的后代,则应该赋予它较大的适应度,在这里,必须对适应度函数进行一些调整。定义新的适应度函数为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n r_{ij}, r_{ij} = \begin{cases} 1, & i \neq r_{ij} \\ n^{n-i+2}, & i = r_{ij} \end{cases} \quad (4.4.7)$$

这意味着,当一个塔片被移动到了正确位置时,其适应度将急剧增加。具有最大适应度的染色体一旦出现,立刻被大量地繁殖,产生的后代仍然具有同样高的适应度。

第5章 系统的随机性

随机性是复杂系统的重要特征之一。系统演化在开放条件下,除用非线性方程描述外,常常还采用非确定性方程来描述。必然性和偶然性,现实需要两者。本章将在随机过程和随机涨落基本概念基础上,介绍描述随机过程的主方程和福克尔-普朗克(Fokker-Planck)方程、随机网络模型以及它们的应用实例。^{1~4}

5.1 随机过程与随机涨落

5.1.1 随机过程

若一个系统的状态演化可用一个随时间变化的随机变量 $X(t)$ 来描述,则称该系统状态为一随机过程。在数学上若对于每个 $t \in T$ (T 是某个参数集), $X(t)$ 是个随机变量,则称随机变量族 $\{X(t), t \in T\}$ 为随机过程。下面简要介绍随机过程有关的若干基本概念。

5.1.1.1 随机过程的概率密度

我们用

$$P_n(x_n, t; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1)$$

表示随机变量 X 在 t_1 时刻取 $x_1, \dots, t_n$ 时刻取 x_n 的联合概率密度,显然 P_n 具有以下性质:

- (1) 正定条件, $P_n \geq 0$;
- (2) 对称条件,交换任意两对 (x_k, t_k) 和 (x_j, t_j) 时 P_n 不变;
- (3) 可约条件,

$$\int P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1) dx_n = P_{n-1}(x_{n-1}, t_{n-1}; x_{n-2}, t_{n-2}; \dots; x_1, t_1) \quad (5.1.1)$$

- (4) 归一化条件, $\int P_1(x_1, t_1) dx = 1$ 。

由于利用 P_n 可计算各阶矩,如

$$\begin{aligned} & \langle X(t_1)X(t_2)\dots X(t_n) \rangle \\ &= \int x_1 x_2 \dots x_n P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1) dx_n dx_{n-1} \dots x_1 \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

因此,联合概率密度描述了随机过程的统计规律性。由联合概率密度还可以定义条件概率,我们用

$P_{n,m}(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_{m+1}, t_{m+1} | x_m, t_m; \dots; x_1, t_1)$ 表示固定 $(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_m, t_m)$ 时,随机变量 X 具有 $(x_{m+1}, t_{m+1}; x_{m+2}, t_{m+2}; \dots; x_n, t_n)$ 的联合概率密度,称为条件概率,它由以下恒等式定义:

$$\begin{aligned} P_{n,m}(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_{m+1}, t_{m+1} | x_m, t_m; \dots; x_1, t_1) \\ \equiv \frac{P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1)}{P_m(x_m, t_m; x_{m-1}, t_{m-1}; \dots; x_1, t_1)} \end{aligned} \quad (5.1.3)$$

5.1.1.2 平稳性

如果一个随机过程对一切 n 和 τ 均有

$$\begin{aligned} P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1) \\ = P_n(x_n, t_n + \tau; x_{n-1}, t_{n-1} + \tau; \dots; x_1, t_1 + \tau) \end{aligned} \quad (5.1.4)$$

则称该随机过程是平稳的。将上式代入(5.1.2)得

$$\langle X(t_1 + \tau) X(t_2 + \tau) \dots X(t_n + \tau) \rangle = \langle X(t_1) X(t_2) \dots X(t_n) \rangle \quad (5.1.5)$$

特别有 $\langle X(t + \tau) \rangle = \langle X(t) \rangle = \text{常数}$ 。因此,平稳随机过程又可以定义为各阶矩不受时间平移影响的过程。

5.1.1.3 随机过程的统计参数

随机过程的主要统计参数除各阶矩外,还有时间自相关函数、方差函数和自相关时间。自相关函数的定义是

$$\begin{aligned} K(t_1, t_2) &\equiv \langle \langle X(t_1) X(t_2) \rangle \rangle \\ &= \langle \{X(t_1) - \langle X(t_1) \rangle\} \{X(t_2) - \langle X(t_2) \rangle\} \rangle \\ &= \langle X(t_1) X(t_1) \rangle - \langle X(t_2) \rangle \langle X(t_2) \rangle \end{aligned} \quad (5.1.6)$$

它描述了随机变量 $X(t)$ 在不同时刻取值间的相关性。若 $t_1 = t_2$, 则称

$$K(t, t) = \langle X^2(t) \rangle - \langle X(t) \rangle^2 = \sigma^2(t) \quad (5.1.7)$$

为方差函数或均方涨落。

平稳随机过程的自相关函数仅依赖于 $\tau = t_2 - t_1$ 的绝对值,且不受从 $X(t)$ 中扣除常数 $\langle X \rangle$ 的影响,故可用

$$K(\tau) = \langle X(t + \tau) X(t) \rangle \quad (5.1.8)$$

表示。若当 $|\tau| > \tau_0$ 时, $K(\tau) = 0$ 或 $K(\tau)$ 小到可以忽略不计,则称 τ_0 为自相关时间。

5.1.1.4 马尔可夫过程

马尔可夫过程是最重要的一类随机过程。考虑任意 n 个相继时刻 $t_1 < t_2 < \dots < t_n$, 若有

$$P_{n,n-1}(x_n, t_n | x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1) = P(x_n, t_n | x_{n-1}, t_{n-1}) \quad (5.1.9)$$

即给定了 t_{n-1}, x_{n-1} , 则在 t_n 的条件概率被唯一确定, 与更早时刻随机变量 $X(t)$ 的取值无关, 我们称这样的随机过程为马尔可夫过程。换句话说, 马尔可夫过程是一种只对最近的历史数据有记忆的过程。 $P(x_n, t_n | x_{n-1}, t_{n-1})$ 叫做跃迁概率。

利用马尔可夫过程定义(5.1.9)有

$$\begin{aligned} P_3(x_3, t_3; x_2, t_2; x_1, t_1) &= P_{3,2}(x_3, t_3 | x_2, t_2; x_1, t_1) P_2(x_2, t_2; x_1, t_1) \\ &= P(x_3, t_3 | x_2, t_2) P(x_2, t_2 | x_1, t_1) P_1(x_1, t_1) \end{aligned} \quad (5.1.10)$$

继续进行可得

$$P_n(x_n, t_n; x_{n-1}, t_{n-1}; \dots; x_1, t_1) = \prod_{i=2}^n P(x_i, t_i | x_{i-1}, t_{i-1}) P_1(x_1, t_1) \quad (5.1.11)$$

因此, 马尔可夫过程完全由 $P_1(x_1, t_1)$ 和跃迁概率 $P(x_i, t_i | x_{i-1}, t_{i-1})$ 决定。许多物理过程具有这一性质, 可使问题简化, 从而马尔可夫过程得到广泛应用。

5.1.1.5 查普曼-科尔莫戈罗夫方程

将(5.1.10)两边对 x_2 积分, 对时间序列 $t_1 < t_2 < t_3$ 有

$$P_2(x_3, t_3; x_1, t_1) = P_1(x_1, t_1) \int P(x_3, t_3 | x_2, t_2) P(x_2, t_2 | x_1, t_1) dx_2$$

再除以 $P_1(x_1, t_1)$, 得到

$$P(x_3, t_3 | x_1, t_1) = \int P(x_3, t_3 | x_2, t_2) P(x_2, t_2 | x_1, t_1) dx_2 \quad (5.1.12)$$

(5.1.12) 叫做查普曼-科尔莫戈罗夫方程 (Chapman-Kolmogorov equation)。它是任何马尔可夫过程的跃迁概率必须服从的方程。方程的意义是, 对于马尔可夫过程, 一大步的转移可通过相继两小步的转移来达到, 而两小步的跃迁概率统计独立。

5.1.2 随机涨落

5.1.2.1 随机涨落现象

我们先讨论一个非常简单的模型,来说明在随机过程和建立平衡态的过程中的涨落现象。考虑两个装有 N 个球的盒子 A 和 B,这 N 个球以 $1, 2, \dots, N$ 为标记,最初的状态是 A 盒装有 N_1 个球, B 盒装有 N_2 个球,以相同的概率 $1/N$ 随机地选取 N 个球中的一个。假设选到某个球,就把这个球从装它的盒中取出放入另一个盒中,考察 N_1 和 N_2 随时间的变化情况。因为 $N_2 = N - N_1$,所以只需考虑独立变量 N_1 。在 t 时刻,发现 N_1 的概率记为 $P(N_1, t)$,这是一个典型的马尔可夫过程。当把一个球从 B 中取出放入 A 中或把一个球从 A 中取出放入 B 中时,都会使概率函数 $P(N_1, t)$ 发生变化。我们用 $\omega(N_1, N_1 - 1)$ 表示盒 A 中放入一个球的概率, $\omega(N_1, N_1 + 1)$ 表示盒 A 中取出一个球的概率,则 $\omega(N_1, N_1 - 1)$ 和 $\omega(N_1, N_1 + 1)$ 分别为 $N_1 - 1$ 和 $N_1 + 1$ 跃迁到 N_1 的跃迁概率,而

$$P(N_1, t) = \omega(N_1, N_1 - 1)P(N_1 - 1, t - 1) + \omega(N_1, N_1 + 1)P(N_1 + 1, t - 1) \quad (5.1.13)$$

且跃迁概率 $\omega(N_1, N_1 - 1)$, $\omega(N_1, N_1 + 1)$ 分别为

$$\omega(N_1, N_1 - 1) = \frac{N_2 + 1}{N} = \frac{N - N_1 + 1}{N} \quad (5.1.14)$$

$$\omega(N_1, N_1 + 1) = \frac{N_1}{N} \quad (5.1.15)$$

因此, (5.1.13) 为

$$P(N_1, t) = \frac{N - N_1 + 1}{N} P(N_1 - 1, t - 1) + \frac{N_1}{N} P(N_1 + 1, t - 1) \quad (5.1.16)$$

对于任意的初始分布都将趋于一个唯一的定态解

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(N_1, t) = P(N_1) = \frac{N!}{N_1!(N - N_1)!} \alpha \quad (5.1.17)$$

其中归一化常数 α 由以下条件确定

$$\sum_{N_1} P(N_1, t) = 1, \quad \alpha = 2^{-N} \quad (5.1.18)$$

(5.1.17) 给出的结果表明:定态解是一个关于随机变量 N_1 的分布函数,盒 A 中的球数不是完全确定的,即不可能概率为 1 地在盒 A 中找到 $N/2$ 个球,在盒 B 中找到 $N/2$ 个球。总有一定的偶然性,出现 A 中球数 $N_1 \neq N_2$,这就

出现了涨落。给定初态 N_0 , 系统总有可能回到这个特定的初态 N_0 , 整个系统并不是趋向唯一的平衡态 $N_1 = N/2$ (见图 5.1.1(a))。当 N 非常大时, 定态分布函数是围绕 $N_1 = N/2$ 的很尖锐的峰, 分布函数实际上近似于一个 δ 函数, 即使有涨落, 偏离 $N/2$ 很大的情况是罕见的 (见图 5.1.1(b)), 这又一次说明了熵的意义。

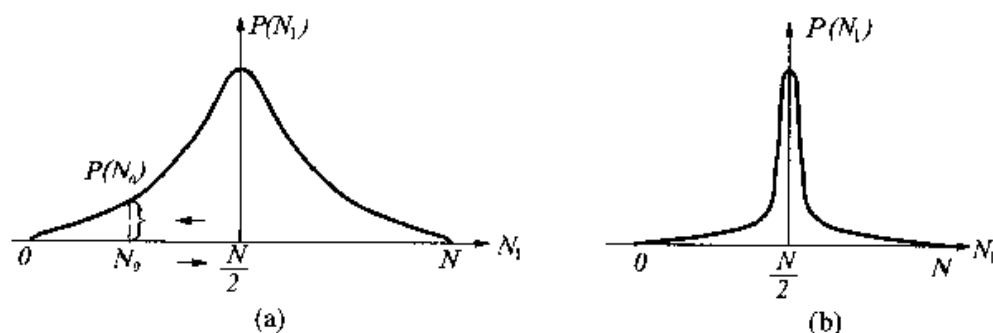


图 5.1.1 随机变量 N_1 的定态解

因为由 $\frac{N!}{N_1!N_2!}$ 种实现状态 $N!$ 的方法, 所以熵由下式决定

$$S = k_b \ln \frac{N!}{N_1!N_2!} \quad (5.1.19)$$

或者

$$N/2 = -k_b \sum_{i=1}^2 P_i \ln P_i \quad (5.1.20)$$

其中 $P_i = \frac{N_i}{N}$, $i = 1, 2$

(5.1.20) 在 $P_1 = P_2 = 1/2$ 处熵具有极大值。由于不可逆过程, 系统将离开它的初始状态 N_0 ($\neq N/2$), 趋向于平衡态 (最概然状态) $N/2$ 。当系统处在平衡态时, 球从 A 到 B 的跃迁概率与从 B 到 A 的跃迁概率近似相等, 但仍然有涨落, 这似乎是热力学不可逆过程与随机涨落之间的矛盾。若我们等待很长的时间 t_r , 则整个系统回到其初始状态 N_0 的概率为一定值, 回归时间 t_r 为

$$t_r \approx \frac{\tau}{P(N_0)} \quad (5.1.21)$$

式中 τ 为每一次跃迁时间, t_r 为出现两次相等的宏观态之间的平均时间。

5.1.2.2 涨落的度量

涨落在自然界中总是存在的。为了描述系统定态分布的尖锐程度 (见

图 5.1.1), 换句话说, 涨落的大小, 我们用方差和协方差这两个具有统计性质的量来度量涨落。方差用来度量对于均值涨落的重要性, 协方差用来度量系统中不同空间区域之间相关的程度。实际上, 所谓平衡状态下的均匀体系存在着涨落, 由方差公式可以求出表征涨落重要性的公式——统计离散度 σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\langle \delta X^2 \rangle}{\langle X \rangle^2}} \quad (5.1.22)$$

例如均匀状态下的理想气体, V 、 N 分别代表总体积和总粒子数, ΔV 为 V 中的小体积元, n 为 ΔV 中的粒子数。由于系统是均匀的, 任何一个特定的粒子在体积元 ΔV 中的概率显然由 $\Delta V/V$ 给出, 并且 n 个给定粒子同时在体积元 ΔV 中的概率为 $(\Delta V/V)^n$ 。因此, ΔV 中含有 n 个可辨识粒子的概率可由二项式分布给出

$$P_n = \binom{N}{n} \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^n \left(1 - \frac{\Delta V}{V} \right)^{N-n} \quad (5.1.23)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 且 $\Delta V \ll V$ 时, 二项式分布趋向于泊松分布

$$P_n = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}} \quad (5.1.24)$$

其中 $\bar{n}$ 是 ΔV 中粒子数的算术平均值。对于泊松分布, 计算可得: 均值 $\langle n \rangle = \bar{n}$, 二次矩 $\langle n^2 \rangle = \bar{n}^2 + \bar{n}$, 方差 $\langle \delta n^2 \rangle = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2$ 。另外, 两个体积元 ΔV_1 和 ΔV_2 中含有 n_1 和 n_2 个粒子的联合概率分布的协方差 $\langle \delta n_1 \delta n_2 \rangle = \langle n_1 n_2 \rangle - \langle n_1 \rangle \langle n_2 \rangle = 0$ 。这说明理想的均匀体系中按泊松分布的协方差为零, 意味着完全没有空间的关联性, 这种状态是平衡无序结构。统计离散度

$\sigma = \sqrt{\frac{\langle \delta n^2 \rangle}{\bar{n}^2}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}$, 可见涨落的重要性与体积元 ΔV 的大小有关。只要体积元 ΔV 比分子的尺度大得多, 其值就很小。如果 ΔV 为 1 立方厘米, 则 $1/\sqrt{\bar{n}}$

约为 $10^{-8}\%$ 。现在回到物理系统的宏观参数上, 一个物理系统是由千千万万个分子组成的, 系统的宏观变量如温度、密度、能量和熵等都是众多微观粒子的统计宏观效应。大数定理告诉我们, 统计上独立的 n 个随机变量的算术平均值 $\bar{X}$ 按概率收敛于其统计平均值 $\langle X \rangle$ 。因此, 这时候宏观参数对于统计均值的偏离很小, 涨落是微涨落。

5.1.2.3 涨落的作用

涨落对于系统结构演化起着重要作用, 适应性和可靠性是它的主要作

用。设系统处于某种状态 q_1 (见图 5.1.2), 涨落驱使系统去探索新的状态 q_2 。若没有涨落, 系统决不会认识到 q_2 是一个更稳定的状态。若涨落存在, 可通过扩散过程使系统从 q_1 到 q_2 。状态 q_2 是一个更能适应周围环境的状态, 原来的状态 q_1 (暂时) 被淘汰。这是一种选择, 涨落和选择之间的作用导致系统的演化, 适应新的竞争环境。另一方面, 涨落的出现使系统可靠性降低。例如电子学中的隧道二极管, 它的工作状态可用一个状态变量 q 和势曲线来描述。它通过外部作用, 引起隧道二极管进入状态 q_2 并储存信息。可是, 由于涨落作用, 系统可能漂移到状态 q_1 , 使其丧失储存功能。因此, 涨落具有两面性: 适应性要求大些涨落和平坦的势曲线, 而可靠性要求小些涨落和深谷势曲线或近似于 δ 函数的尖峰定态分布。通过降低势垒, 使系统从 q_1 状态到 q_2 状态, 当系统进入 q_2 状态时, 再提高势垒, 使系统继续保持在 q_2 状态, 即通过外部的作用和微涨落放大而使系统演化。

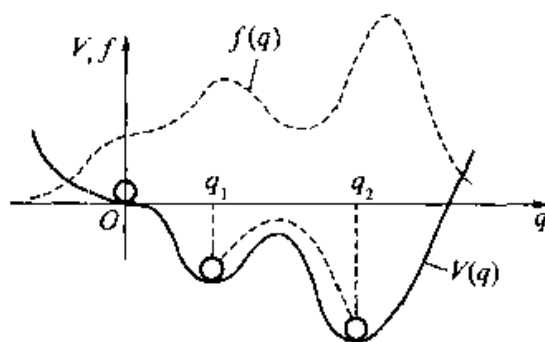


图 5.1.2 $V(q)$ 为势函数, $f(q)$ 为定态解

微涨落放大还可以通过分岔引起稳定性交换来说明。正常情况下, 涨落对于统计均值是一个小量, 不会影响原结构的稳定性。然而在临界点处, 情况就不同了, 这时候微涨落放大, 有可能形成巨涨落, 涨落的效应达到了宏观的等级。以叉式分岔的随机模拟为例, 当模拟次数 n 很大时, 对于叉式的叉柄段, 定态分布形如图 5.1.3(a), 近似于 δ 函数, $k > k_c = 0$, 有唯一统计吸引子 $\bar{X}$, 统计离散度 $\sigma = 0$, 代表典型的无序状态。当控制参量变化, 系统到达临界点 $k = k_c = 0$ 时, 定态分布由于临界慢化 (critical slowing-down) 转变为扁平状态, 见图 5.1.3(b)。最后, 在 $k < k_c$ 的区域, 定态分布变为双峰状态, 见图 5.1.3(c)。定态分布的极大值分别对应于分岔后出现的两个新的吸引子。设双峰分布的极大值出现在 $X = X_1$ 和 $X = X_2$, X_1 和 X_2 被一对应于极小值的 $X = X_0$ 所分开。为计算方便, 我们仍用两个 δ 函数进行

简化,计算均值、二次矩和方差分别为

$$\text{均值: } \langle X \rangle = \frac{1}{2}(X_1 + X_2) \quad (5.1.25)$$

$$\text{二次矩: } \langle X^2 \rangle = \frac{1}{2}(X_1^2 + X_2^2) \quad (5.1.26)$$

$$\text{方差: } \langle \delta X^2 \rangle = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 = \frac{1}{4}(X_1 - X_2)^2 \quad (5.1.27)$$

统计离散度为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\langle \delta X^2 \rangle}{\langle X \rangle^2}} = \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1} \quad (5.1.28)$$

这种微涨落放大效应,十分明显地违背了中心极限定理,图 5.1.3(c)无论如何不能视为统计独立的任意变量之和了,说明系统内出现了相干行为,系统内出现相干的原因是由微涨落放大所引起的。

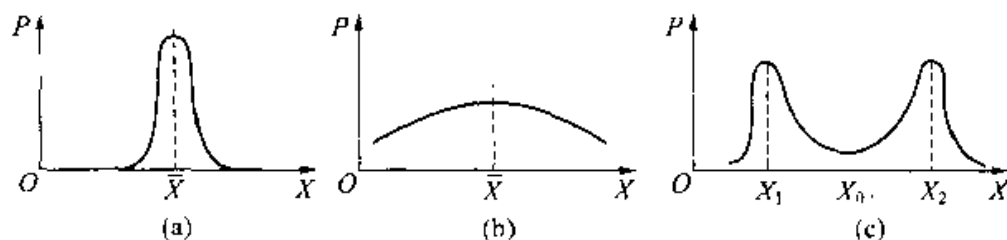


图 5.1.3 叉式分岔的随机模拟

5.2 主方程和福克尔-普朗克方程

主方程是一类研究离散型的随机行走问题的模型方法,福克尔-普朗克方程则是研究一类受无规则变化的随机力影响的“粒子”运动方程,是一类研究连续型的随机微分方程的系统化方法,在社会、经济、生态系统中有一些应用。例如,西德学者魏德利希(W. Weidlich)和黑格(G. Hagg)利用主方程和福克尔-普朗克方程研究社会舆论的形成和演化问题(见 7.5.1.2 节)。

5.2.1 随机行走模型及其主方程

类似于球在赌博机中随机行走(图 5.2.1),我们在模型中假设一粒子沿 1 维链条作向左或向右跳跃运动。在链条上,粒子可以用相等的概率从一点跳到两个相邻点之一上去。于是我们要求在 n 步之后粒子到达某点与它开始时地点的距离 m 的概率。把向右运动称为“成功”,向左运动称为“失败”,则粒子的最后位置 m 就是它成功 s 次和失败 $(n - s)$ 次后达到的位

置。若每一步长度为 1, 则粒子到达的位置为

$$m = s - (n - s) = 2s - n \quad (5.2.1)$$

在 $n=4$ 的随机行走中, 当 $s=0$, 即 4 次都未成功时, 只有一种组合, 概率为 $(1/2)^4$, 位置 $m = -4$; 当 $s=1$, 即只有 1 次成功时, 有 4 种组合, 概率为 $4 \times (1/2)^4$, 位置 $m = -2$; 当 $s=2$, 即有 2 次成功时, 有 6 种组合, 概率为 $6 \times (1/2)^4$, 位置 $m = 0$; 当 $s=3$, 即有 3 次成功时, 有 4 种组合, 概率为 $4 \times (1/2)^4$, 位置 $m = 2$; 最后当 $s=4$, 即 4 次都成功时, 有 1 种组合; 概率为 $(1/2)^4$, 位置 $m = 4$ 。因此, 在 n 次试验中出现成功 s 次的概率为二项式分布

$$P(s, n) = \binom{n}{s} \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (5.2.2)$$

更一般地, 当成功的概率为 p , 失败的概率为 q 时, 则

$$P(s, n) = \binom{n}{s} p^s q^{n-s}, \quad p + q = 1 \quad (5.2.3)$$

当随机行走步数 n 很大时, 二项式分布趋向于泊松分布。如果以 τ 表示每一步的转换时间, 则 n 步后的时间为

$$t = n\tau \quad (5.2.4)$$

因此, 这是一个在时间中进行的随机过程。

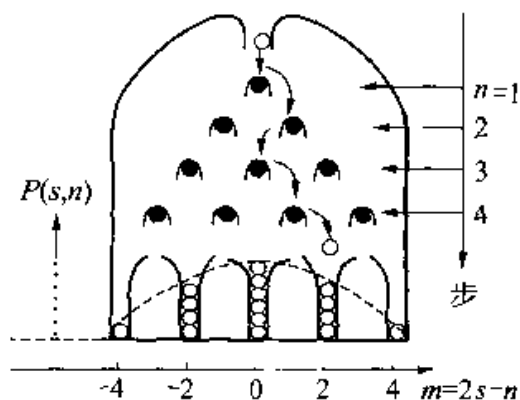


图 5.2.1 球在赌博机中的随机行走

我们的目的是要建立在 $n+1$ 次跳动后粒子位于 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 的概率方程, 用 $P(m, n+1)$ 来表示这个概率。由于粒子每次只能跳过距离“1”, 则在 n 次跳动后, 粒子必定在 $m-1$ 或 $m+1$ 的位置上, 使得在 $n+1$ 次跳动时刚好达到 m 位置。在 n 次跳动后位于 $m-1$ 和 $m+1$ 的概率分别为 $P(m-1, n)$ 和 $P(m+1, n)$, 因此, $P(m, n+1)$ 是由粒子的两种跃迁概

率组成的,即

$$P(m, n+1) = \omega(m, m-1)P(m-1, n) + \omega(m, m+1)P(m+1, n) \quad (5.2.5)$$

其中, $\omega(m, m-1)$ 和 $\omega(m, m+1)$ 分别为粒子从 $m-1$ 和 $m+1$ 到 m 的跃迁概率。当 n 次跳动后粒子在 $m-1$ 处时, 则 $n+1$ 次跳动后粒子在 m 处的概率由乘积 $\omega(m, m-1)P(m-1, n)$ 给定。同样, 当 n 次跳动后粒子在 $m+1$ 处时, $n+1$ 次跳动后粒子在 m 处的概率为 $\omega(m, m+1)P(m+1, n)$, 而两者是独立的事件, 且

$$\omega(m, m-1) + \omega(m, m+1) = 1 \quad (5.2.6)$$

这个模型使我们能以简单的方式来解释一些概念。下面将引入联合概率, 并且推广到与时间有关的过程中去。作为一个例子, 考虑粒子在 n 步处在点 m' 和 $n+1$ 步处在点 m 的概率 $P(m, n+1; m', n)$ 。上面已讨论过了这个概率由两个部分组成。粒子走 n 步到达点 m' 的概率是 $P(m', n)$, 于是, 它从 m' 到 m 的跃迁概率必定是 $\omega(m, m')$ 。这样一来, 联合概率可一般地写为如下形式

$$P(m, n+1; m', n) = \omega(m, m')P(m', n) \quad (5.2.7)$$

因为粒子每次都被推离其原有位置, 故

$$m \neq m' \quad (5.2.8)$$

又因为它只能跳过距离“1”, 故有

$$|m - m'| = 1 \quad (5.2.9)$$

可见, 除非 $m' = m \pm 1$ (在我们的例子中), 否则 $\omega(m, m') = 0$ 。现在来讨论 (5.2.5), 令

$$\omega(m, m \pm 1)/\tau = \tilde{\omega}(m, m \pm 1) \quad (5.2.10)$$

我们将把 $\tilde{\omega}(m, m \pm 1)$ 叫做单位时间内的跃迁概率, 从 (5.2.5) 两边减去 $P(m, n)$, 并且用 τ 除两边, 再使用 (5.2.6), 就得到下面的结果

$$\begin{aligned} & \frac{P(m, n+1) - P(m, n)}{\tau} \\ &= \tilde{\omega}(m, m-1)P(m-1, n) + \tilde{\omega}(m, m+1)P(m+1, n) - \\ & \quad [\tilde{\omega}(m+1, m) + \tilde{\omega}(m-1, m)]P(m, n) \end{aligned} \quad (5.2.11)$$

我们用 $t = n\tau$ 把变量 n 与时间变量 t 联系起来, 从而引入如下的概率测度

$$\tilde{P}(m, t) = P(m, n) \equiv P(m, t/\tau) \quad (5.2.12)$$

(5.2.12) 中的 $\tilde{P}(m, t)$ 是函数 $P(m, t/\tau)$ 的简写, 现近似地用对时间求微

分来表示(5.2.11)的左边,即

$$\frac{P(m, n+1) - P(m, n)}{\tau} \approx \frac{d\tilde{P}(m, t)}{dt} \quad (5.2.13)$$

结果原方程式(5.2.5)可表示为

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{P}(m, t)}{dt} = & \tilde{\omega}(m, m-1)\tilde{P}(m-1, t) + \tilde{\omega}(m, m+1)\tilde{P}(m+1, t) - \\ & [\tilde{\omega}(m+1, m) + \tilde{\omega}(m-1, m)]\tilde{P}(m, t) \end{aligned} \quad (5.2.14)$$

这一方程称作主方程。

现在考虑更一般的情形,即该系统可用一个矢量 m 形式的离散变量进行描述。 t 时刻在点 m 找到粒子的概率,由于粒子从其他点 m' 跃迁到该点而增加,由于离开该点而减少,即有一般关系

$$\dot{P}(m, t) = \text{增加率} - \text{减少率} \quad (5.2.15)$$

因为增加率是由所有从点 m' 到点 m 的跃迁所组成,故它就是由对点 m' 求和而成的,其中每一项都是由在点 m' 找到粒子的概率乘以每秒从点 m' 到点 m 的跃迁概率所给出,即

$$\text{增加率} = \sum_{m'} \omega(m, m') P(m', t) \quad (5.2.16)$$

同理,可得减少率的跃迁关系式

$$\text{减少率} = P(m, t) \sum_{m'} \omega(m', m) \quad (5.2.17)$$

把(5.2.16)与(5.2.17)两式代入(5.2.15)中,我们得到

$$\dot{P}(m, t) = \sum_{m'} \omega(m, m') P(m', t) - P(m, t) \sum_{m'} \omega(m', m) \quad (5.2.18)$$

(5.2.18)描述的方程叫做主方程。

5.2.2 福克尔-普朗克方程

流体分子对布朗粒子的作用,可分解为两部分:连续变化的粘滞阻力 $F = -\alpha v(t)$ 和无规则变化的随机力 $F_s(t)$ 。于是粒子的运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = -\alpha v(t) + F_s(t)$$

或

$$\frac{dv}{dt} = -\gamma v(t) + \xi(t) \quad (5.2.19)$$

(5.2.19)称为朗之万方程。它描述了随机变量 $v(t)$ 本身随时间的演化,其中

$$\gamma = \frac{\alpha}{m}, \quad \xi(t) = \frac{F_s(t)}{m}$$

并对 $\xi(t)$ 的统计性质提出了以下假设:

$$(1) \langle \xi(t) \rangle = 0$$

$$(2) \langle \xi(t) \xi(t') \rangle = D \delta(t - t')$$

即随机力 $\xi(t)$ 具有 δ 自关联函数或为零的自关联时间, 常数 D 为 $\xi(t)$ 的均方涨落或叫噪声强度。具有特性(1)和(2)的随机力 $\xi(t)$, 称为白噪声。(5.2.19)描写了布朗运动的物理过程(随机过程)。

由于朗之万方程的解 $v(t)$ 是随机变量, 可以用 $P(v, t)dv$ 表示在 t 时刻粒子的速度 $v(t)$ 落在 $v \sim v + dv$ 间的概率, $P(v, t)$ 叫速度概率密度。由朗之万方程(5.2.19)可推导出布朗粒子速度概率 $P(v, t)$ 的演化方程, 它的形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} P(v, t) = \gamma \frac{\partial}{\partial v} (vP) + \frac{D}{2} \frac{\partial^2}{\partial v^2} P \quad (5.2.20)$$

(5.2.20)就是福克尔-普朗克方程最简单的特例, 与朗之万方程(5.2.19)等价。一般地, 1 维的福克尔-普朗克方程为

$$\frac{df(q, t)}{dt} = \frac{d}{dq} (\gamma q f(q, t)) + \frac{D}{2} \frac{d^2}{dq^2} f(q, t) \quad (5.2.21)$$

它描写了在时间过程中粒子概率分布的变化(见图 5.2.2)。 $k = -\gamma q$ 称为漂移系数, D 称为扩散系数。当 $\gamma = 0$ 时,

$$\frac{df(q, t)}{dt} = \frac{D}{2} \frac{d^2}{dq^2} f(q, t) \quad (5.2.22)$$

我们称为扩散方程。

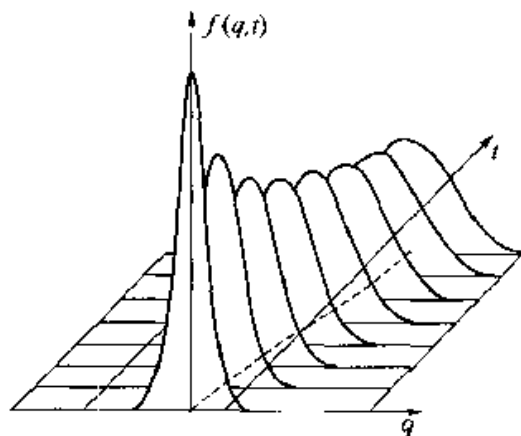


图 5.2.2 $f(q, t)$ 作为 t 和 q 函数的例子, 虚线是最概然轨道

这样的方法也可以应用到多变量和任意力 $K_i(q)$ 的一般情况。如果我们假设对应的朗之万方程的形式是：

$$\dot{q}_i = K_i(q) + \xi(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.2.23)$$

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_n),$$

$$K = (K_1(q), K_2(q), \dots, K_n(q))$$

有 δ 型相关的涨落力 $\xi(t)$

$$\langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = D_{ij} \delta(t - t'), \quad (5.2.24)$$

在 t 时刻, 描述粒子在 q 空间的运动轨迹的概率密度则为

$$P(q, t) = \delta(q_1 - q_1(t)) \delta(q_2 - q_2(t)) \dots \delta(q_n - q_n(t)) \quad (5.2.25)$$

在 q 空间的分布函数 f 则为

$$f(q, t) = \langle P(q, t) \rangle \quad (5.2.26)$$

和 1 维情况类似, 由 (5.2.23), 同样可以得到福克尔-普朗克方程

$$\dot{f}(q, t) = -\nabla_q(Kf(q, t)) + \frac{1}{2} \sum_{ij} D_{ij} \frac{\partial^2}{\partial q_i \partial q_j} f(q, t) \quad (5.2.27)$$

其中 ∇_q 是拉普拉斯算子符号。

5.2.3 福克尔-普朗克方程的定态解

福克尔-普朗克方程在复杂系统理论研究中应用很广, 我们将给出怎样去求福克尔-普朗克方程的定态解。

定态解是按 $\dot{f} = 0$ 定义的, 即 f 与时间无关。同样, 先看 1 维例子, 我们采用 f 的“自然边界条件”, 它意味着 $q \rightarrow \pm\infty$ 时, $f = 0$ 且 $\frac{df}{dq} = 0$, 因此由 (5.2.21) 有

$$\frac{D}{2} \frac{df}{dq} = Kf \quad (5.2.28)$$

(5.2.28) 有解

$$f(q) = N \exp(-2V(q)/D) \quad (5.2.29)$$

这里

$$V(q) = - \int_{q_0}^q K(q) dq \quad (5.2.30)$$

$V(q)$ 是势能函数, 归一化常数 N 按下式决定:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(q) dq = 1 \quad (5.2.31)$$

下面讨论 n 维情况, 如果漂移系数 $K_i(q)$ 满足如下的势能条件, 所得的

解与(5.2.29)类似

$$K_i = -\frac{\partial}{\partial q_i} V(q), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.2.32)$$

如果扩散系数也遵守条件:

$$D_{ik} = \delta_{ik} D, \quad i, k = 1, 2, \dots, n \quad (5.2.33)$$

那么

$$f(q) = N \exp(-2V(q)/D) \quad (5.2.34)$$

为了说明(5.2.29)和(5.2.34),我们研究两个例子。

【例 5.2.1】

$$K(q) = -\alpha q - \beta q^3 \text{ (确定力)} (\beta > 0)$$

$$V(q) = \frac{\alpha}{2} q^2 + \frac{\beta}{4} q^4 \text{ (势能函数)}$$

$$\dot{q} = -\alpha q - \beta q^3 + \xi(t) \text{ (朗之万方程)}$$

这是尖拐突变的一个特例,当 $\alpha > 0$ 时,定性地与图 5.2.3 的情形相同。

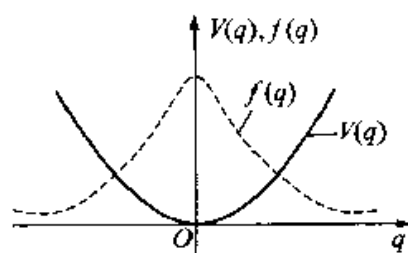


图 5.2.3 当势能 $V(q)$ 取最小值时,定态概率 $f(q)$ 最大

但是,当 $\alpha < 0$ 时,新的情况出现,见图 5.2.4。在没有涨落时,粒子的坐标既可在左边也可在右边的能谷处(对称破缺),而 $f(q)$ 是对称的,“粒子”在两个能谷中以相等的概率出现,如果能谷是深的,并且最初把粒子置于其一的底部,它可以在这里停留很长时间。推到另一能谷的时间问题叫做“首次推移时间问题”。

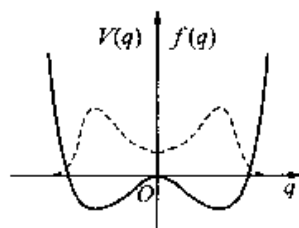


图 5.2.4 例 5.2.1 中 $\alpha < 0$ 的势能 $V(q)$ (实线) 和概率密度 (虚线)

【例 5.2.2】 2 维例子

$$K_i(q) = -\alpha q_i, \quad i = 1, 2$$

$$V(q) = \frac{\alpha}{2}(q_1^2 + q_2^2)$$

$$\dot{q} = -\alpha q_i + \xi_i(t), \quad i = 1, 2$$

这里 $\langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = D_{ij} \delta(t - t') = \delta_{ij} D \delta(t - t')$ 。

势能曲面和概率密度定性表示在图 5.2.5 中。

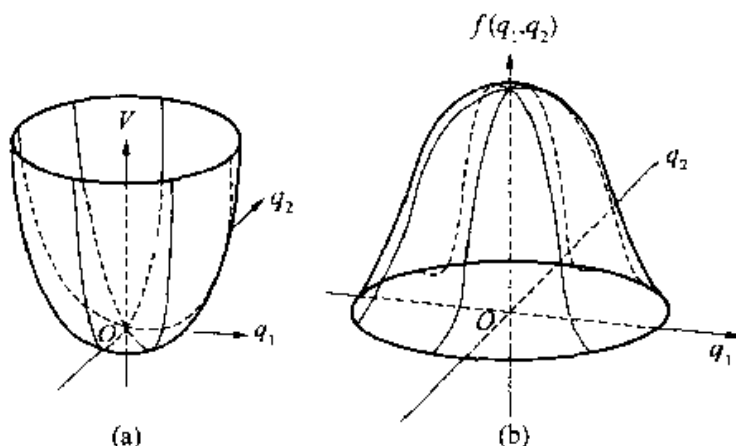


图 5.2.5 例 5.2.2 的势能曲面和概率密度

5.2.4 主方程与福克尔-普朗克方程的研究思路

应用主方程与福克尔-普朗克方程研究问题的方法思路是：

- (1) 先引入所研究系统的构形的基本概念,并建立一个系统模型;
- (2) 根据此模型,写出相应的运动方程,即主方程、福克尔-普朗克方程、朗之万方程等;

(3) 在研究系统的形成和演化时,不对系统的每一单元的特征及其与环境的相互作用进行分析,而采用宏观量来描述统计行为,因而相应模型的运动方程具有随机性,整体与局部的关系上具有涌现性;

(4) 有了运动方程之后,分别求出定态解和含时解,由定态解可以了解到系统的形成作为一个相变过程,它可能出现哪些稳定的系统构形和行为,再通过含时解描述这些构形和行为是如何演化的;然后,可以预测由一种行为(一种构形)转移为另一种行为所需的时间,用实际系统的行为如许多历史事件和政治事件来检验模型的有效性。

5.3 随机网络模型

5.3.1 整体建模框架

传统的评价建模效果的方法是基于“拟合良好性”准则。然而,由于我们研究的模型缺少有关原型的定量信息,难以运用传统的方法。确切地说,“最好的模型”应该十分像原型,就像是原型的复制品。然而,如果一个模型与原型相似到不能将两者分辨开来时,这个模型将和原型一样复杂,用它来解释原型的行为就失去了意义。因此,我们只对原型的某些方面进行建模。当然,我们可以建立许多这样的模型,它们与原型的某个或某些方面相似。这就引出了模型的“整体”概念。假定我们掌握了被建模的原型或现象的局部细节,但是没有充足的时间或者是不可能知道它的全部复杂性。我们希望建立一些模型来反映典型的局部细节,同时对原型的全局行为有更多的了解。研究表明,根据原型的局部细节建立的模型,表现出来的全局行为与该原型所表现出来的全局行为相似是合理的。

我们为什么要研究从符合局部细节的模型集合中如何产生“整体”呢?首先,构造原型的模型组成的模型集合非常大,模型表现出来的全局行为很多,也有许多全局行为与原型不相符。因此,通过将模型集合划分开来,我们试图定义“整体”,使得对不同的整体,其行为各不相同。再从这些整体中找出全局行为与原型相似的整体。第二,将考虑的模型按结构说明和(或)功能控制分成不同的等价类,结构说明和(或)功能控制可看成是原型局部细节的静态描述。这些等价类定义了我们的“整体”。如果有一个整体集合,并且知道原型的一些全局行为,则必定有某些整体与原型比较相符。我们可以描述整体集合中的每个“典型”整体行为。模型的等价类自身通常比较大,因而穷举描述是不可行的,我们应该从每个等价类中抽样来得到“典型”行为。幸好,等价类的数量通常是合理的。

可以应用常用的统计描述方法(如经验分布、期望、方差等)来检验典型的整体行为,从而判断不同的等价类对应的典型行为是否存在差异。如果差异不存在,则这样定义的等价类是无效的,需要寻找新的等价类定义。如果差异存在,则我们还希望可将这些差异按结构说明和(或)功能控制的级别排序。我们可以寻找其典型行为与原型最相似的整体,实际上,没有一个整体的行为与原型充分符合。在这种意义下,如果整体在结构说明和功能控制的不同级别上都产生了多样的行为,那么这样的整体是令人满意的。

我们接受一个事实,即原型的未知细节导致整体的变化。我们需要原型局部细节的静态描述来产生整体的多样性。

假定整体足够多,如果想以一种特定的方式更改原型的行为,这意味着寻找其典型行为,并按恰当的方式更改整体,反过来,也可以认为整体行为的范围描述了原型行为的范围。结构和功能控制级别的变化或扰动若导致模型行为发生变化,则也会导致原型的行为发生变化。这样,我们就可以通过以某些方式作用于模型,来得到原型合乎需要的行为以及它对外部扰动的反应。

上面表述了整体方法的本质,说明了我们应用这种方法最希望得到的结果。整体方法的目的是:掌握整体的行为以便对原型的行为有更好的理解。基于整体建模方法的流程图,如图 5.3.1 所示。为了了解整体建模方法,我们以开关网络模型为例加以说明,即从模型整体中对模型进行随机抽

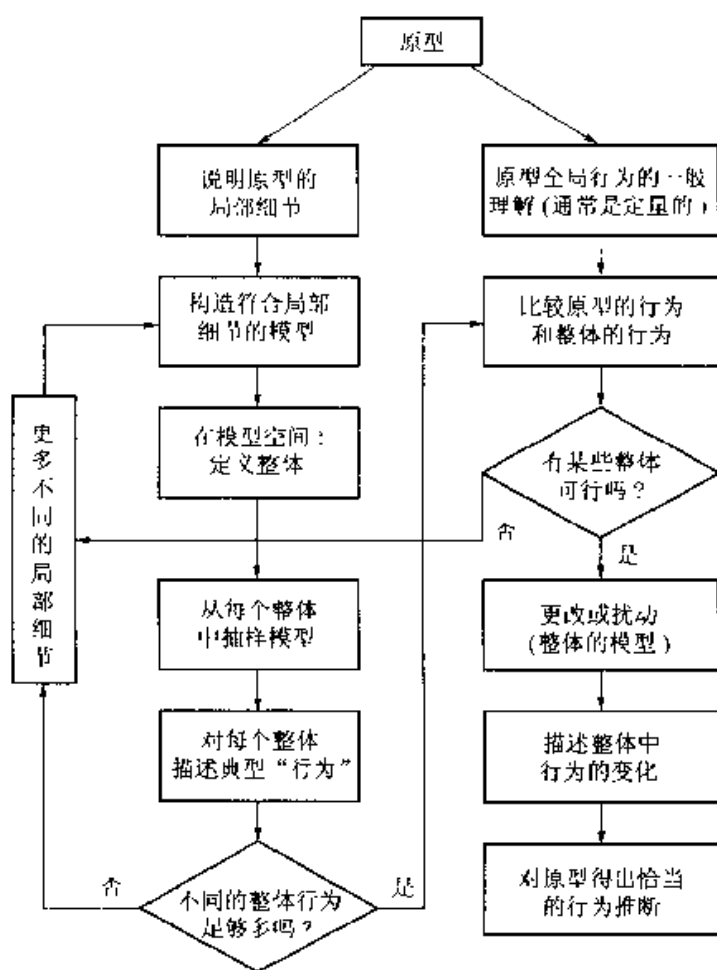


图 5.3.1 整体建模方法流程图

取的思想出发,研究一类随机网络模型,这隐含着分析的整体方法。

5.3.2 开关网络模型

5.3.2.1 开关网络模型的概念

开关网络模型在概念上是简单的,但是,它在行为上却具有多样性和复杂性。对该模型的期望行为的研究,体现了上面提到的整体建模方法,从而提供了一般系统建模中所涉及到的各类部件的微观视角。简单开关网络在理论上是复杂系统的有吸引子的例子。首先区别一下静态和动态网络描述。静态网络描述是指说明网络结构,动态描述是指说明网络在不同时刻的行为。

(一) 基本定义

1. 开关网络:我们把二进制开关网络看成一个带有布尔变换相关集合的网络。假设网络没有外部输入,即网络是自治的。形式上,这样的网络是一个二元组 (N, K) ,表示 N 个节点, K 是 $N \times N$ 连接矩阵,表示节点间的连接情况。 K 中的元素只能是0或1。当 $K(i, j) = 1$ 时,表示从 i 节点到 j 节点有一个连接;而当 $K(i, j) = 0$ 时,表示没有连接。 K 中对角线上的元素,即 $K(i, i)$,为1表示“反馈”,即第 i 个节点的一个输入来自其自身的输出。

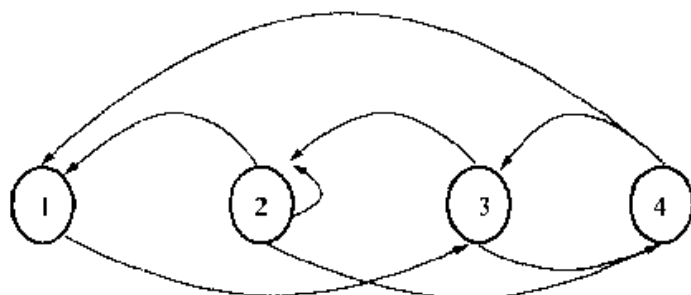
2. 连接:其含义是节点间直接相连。

3. 连通:一个节点可以中间经过几个节点到达另一个节点,称这样的节点是连通的。称 i 与 j 是 p 步连通的,是指在 K^p (通常是矩阵乘法)中 $K^p(i, j) = 1$ 。即 i 节点经 p 步与 j 节点相连。

4. 出度与入度:定义矩阵 K 的第 i 行元素之和为第 i 个节点的出度,第 i 列元素之和为第 i 个节点的入度。固定的出度与入度 k ,意味着 K 的每列(行)具有相同的 k 。如果网络具有固定的输入和输出连接,则说它是齐性的,即到每个节点的输入连接数与发自该节点的输出连接数相等。如果 $k = N$,则网络是充分连接的。当出度 = 入度 = 2时,可以形式化为一个“邻接”网络。关于输出连接,自然就联想到神经网络的研究。但在开关网络中,输入连接是更为关键的,在定义每个节点的响应的布尔变换时,需要明确的输入连接数量。

通常规定输入连接 k 固定不变,输出连接随节点的不同而变化,图5.3.2是一个 $N = 4, K$ 给定的网络,其中

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

图 5.3.2 一个 $N=4$ 、 K 给定的网络

(二) 布尔变换集

开关网络不只是一个网络,我们定义一个相关的布尔变换集,网络中的每个节点都有这样的变换集。布尔变换函数是一种映射或规则,对每个具有 k 个输入节点,在各种输入值向量下,规定相应的输出值。由于输入值和输出值都是二进制的,因此,映射 f 可以表示为

$$f: \times \{0,1\}^k \rightarrow \{0,1\}$$

只有从所有布尔变换集中选择一些特殊的变换,才能获得模型的多样、复杂的行为。选择布尔变换时的各种约束使我们可以对模型施加可解释的、复杂的控制。

1. 开关网络的等价表示

(1) 网络 (N, K) 与布尔变换集: 网络 (N, K) 与布尔变换集的定义如上所述,此处不再重复。

(2) 状态图: 对有 N 个节点的开关网络,定义它的状态为一个 N 维向量,其第 i 个分量表示第 i 个节点的当前时刻的状态。每个分量的值域为集合 $\{0,1\}$ 。

网络状态离散地变化, $t+1$ 时刻的状态由各个节点所对应的布尔函数以 t 时刻的状态为输入确定。也就是说, t 时刻节点的输出值决定 $t+1$ 时刻的新的输出值。开关网络的状态图是以网络状态为节点,以节点间的有向弧表示状态间的转移关系的有向图。

(3) 转移矩阵: 转移矩阵的定义见开关网络的定义,这一部分内容在第

4章中也已经介绍过,此处不再重复。

2. 开关网络模型

网络研究可以分为两类:一类是对 k 的确定选择,这是经典图论的研究内容;另一类是对 k 的随机选择,这隐含着分析的整体方法,即从模型的整体中对模型进行随机抽取的思想。我们只限定讨论后者。

在讨论开关网络模型时,连接结构是个重要的概念,它通过随机选择机制被赋值。该机制只限于输入连接 k 固定不变的情形。因此, k 的选择是我们对网络所做的唯一的结构控制。

5.3.2.2 开关网络模型行为的理论结果

(一) 完全随机网络

为了得到行为标准并从理论上说明施加控制的必要性,我们首先考虑完全没有控制的开关网络。这意味着对网络元素之间的相互连接结构和对每个元素的布尔函数的选择都没有限制,对每个元素而言,它对输入信息的反应为 0 或 1 的可能性相同,而且,一个元素的反应不会影响其他任何元素的反应。这些局部性假设保证了网络中元素的反应可以被看成是 2^N 个独立同分布的贝努利变量 ($p = 0.5$)。因而,不管网络的当前状态是什么,它的下一个状态等可能地为 2^N 个状态中的任何一个,即

$$p(\text{当前状态为 } x_i, \text{下一个状态为 } x_j) = \left(\frac{1}{2}\right)^N \quad j = 1, 2, \dots, 2^N$$

这样得到的网络称为完全随机网络,简称随机网络。

对有 n 个状态的随机网络,考虑 $n \times n$ 随机变量矩阵

$$\begin{pmatrix} D_{11}^n & D_{12}^n & \cdots & D_{1n}^n \\ D_{21}^n & D_{22}^n & \cdots & D_{2n}^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ D_{n1}^n & D_{n2}^n & \cdots & D_{nn}^n \end{pmatrix}$$

其中

$$D_{r,i}^n = \begin{cases} 1 & \text{若状态 } x_i \text{ 在长度为 } r \text{ 的循环上} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

我们对下面的变量感兴趣:

$$S_{n,r} = \sum_{i=1}^n D_{r,i}^n = \text{所有长度为 } r \text{ 的循环上的状态之和}$$

$$T_{n,r} = S_{n,r}/r = \text{长度为 } r \text{ 的循环的数量}$$

$$C_i^n = \sum_{r=1}^n D_{ri}^n = \text{状态 } x_i \text{ 所在循环的数量}$$

$$U_n = \sum_{r=1}^n S_{n,r} = \sum_{i=1}^n C_i^n = \text{循环态总数}$$

$$V_n = \sum_{r=1}^n T_{n,r} = \text{循环的数量}$$

上述变量的期望分别为

$$E(S_{n,r}) = (n)_r / n^r \rightarrow 1, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$E(T_{n,r}) = \frac{1}{r} (n)_r / n^r \rightarrow \frac{1}{r}, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$E(C_i^n) = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n (n)_r / n^r \rightarrow 0, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$E(U_n) = \sum_{r=1}^n (n)_r / n^r \rightarrow \infty, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$E(V_n) = \sum_{r=1}^n \frac{1}{r} (n)_r / n^r \rightarrow \infty, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

方差分别为

$$\text{var}(S_{n,r}) = \begin{cases} r \frac{(n)_r}{n^r} + \frac{(n)_{2r}}{n^{2r}} - \frac{[(n)_r]^2}{n^{2r}}, & 2r \leq n \\ r \frac{(n)_r}{n^r} - \frac{[(n)_r]^2}{n^{2r}}, & 2r > n \end{cases} \rightarrow r, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$\text{var}(T_{n,r}) = \frac{1}{r^2} \text{var}(S_{n,r}) \rightarrow 1/r, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$\text{var}(C_i^n) = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \frac{(n)_r}{n^r} - \frac{1}{n^r} \left[\sum_{r=1}^n \frac{(n)_r}{n^r} \right]^2 \rightarrow 0, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$\text{var}(U_n) = \sum_{r=1}^n (2r-1) \frac{(n)_r}{n^r} + \left[\sum_{r=1}^n \frac{(n)_r}{n^r} \right]^2 \rightarrow \infty, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty$$

$$\begin{aligned} \text{var}(V_n) &= \sum_{r=1}^n \frac{1}{r} \frac{(n)_r}{n^r} - \left[\sum_{r=1}^n \frac{1}{r} \frac{(n)_r}{n^r} \right]^2 + \\ &\quad \sum_{\substack{r,s \geq 1 \\ r+s \leq n}} \frac{1}{rs} \frac{(n)_{r+s}}{n^{r+s}} \rightarrow \infty, \quad \text{当 } n \rightarrow \infty \end{aligned}$$

期望循环长度(ECL)为

$$\text{ECL} = E\left(\frac{U_n}{V_n}\right) \geq [E(\sqrt{U_n})]^2 / E(V_n)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\text{ECL} \rightarrow \infty$

(一) 强制性、内部齐性和临界值

理论分析和实验研究的结果表明,当元素数量 N 增大时,完全随机网络在行为上是没有吸引力的。因此,如果要利用开关网络来对实际现象进行建模,就需要对循环空间施加控制,来减少循环数量,并使循环长度更加合理。可以考虑局部控制,即控制单个节点对输入信息的反应。这是通过对决定单个节点状态的布尔函数的选取施加限制来实现的。下面我们将定义几个限制的概念,并说明它们之间的关系。

(1) 强制性:我们称一个映射对给定的某个输入是强制的,若该输入的某个给定状态“强迫”映射的输出为某个确定值,而不管其他输入的值。称这个给定的状态为强制状态。如果一个输入的两个状态都是强制性的,则该映射的值或恒取常数值(平凡映射),或一半为 0,一半为 1。对前一种情形,所有输入的两个状态均是强制的;对后一种情形,仅有一个输入是强制的。

(2) 内部齐性:内部齐性 I 为一个映射的映射值表中 0 的数量和 1 的数量较大的那一个,即 $I = \max\{0 \text{ 的数量}, 1 \text{ 的数量}\}$ 。显然, $2^{k-1} \leq I \leq 2^k$ 。

(3) 临界值:对某个有 k 个输入的映射,若 L 个或 L 个以上输入取同一个确定的值时,映射的取值相同,则称 $L(1 \leq L \leq k)$ 为该映射的(扩展)临界值。称映射的输出值为对应输入值的临界状态。输入值可指定为 0 或 1,对应的临界状态也为 0 或 1。显然 L 是上面的定义成立的最少输入量。

怎样利用这些概念进行局部控制呢?沃克(Walker)等人发现,节点的布尔函数表中相同值的数量(即内部齐性)增加时,循环的长度将缩短。考夫曼发现,输入的数量与循环长度密切相关,他描述了一种蕴涵在循环行为被称为强制性的性质。对某个有 k 个输入的映射,若有 L 或多于 L 个输入取同一个确定的值时,映射的取值相同,称 $L(1 \leq L \leq k)$ 为该映射的临界值。称映射的输出值为对应输入值的临界状态。在理论上,强制性、内部齐性和临界值之间存在一定的内在关系,它们都是进行局部控制的方式。

5.3.2.3 开关网络整体的实验研究

对简单开关网络的整体进行实验可以得到模型行为的细节。有两种主要类型的网络:函数齐次的和函数非齐次的。对前者,所有网络节点的逻辑函数相同;对后者,网络节点的映射都是从函数集合的某个整体中选出的。

就目前的分析方法而言,网络的许多有趣的行为最便于通过直接观察(即仿真)得到。即使有些行为可以通过分析的方法得到,但同时也会带来

一些处理上的麻烦。例如,我们需要计算 $2^N \times 2^N$ 阶的矩阵,当 N 等于 20 甚至更大时,这将是一个难题。

实验方法的主要困难在于,网络行为或循环空间比行为实例的数量要多得多。如果要确定循环长度或进入循环(run-in)长度,基本的实验过程为:建立所研究问题的网络,仿真网络状态转移的一条路线,通过直接检验其中的状态来找出循环。若称被观察路线序列中的状态数量为观察直径 a ,则最大可观察循环的长度为 $a-1$ (因为其中至少有一个状态是重复的),最大可观察的循环 run-in 中有 $a-2$ 个状态,因为至少有一个最小的长度为 1 的循环。因此,我们不能观察任何长度为 a 或超过 a 的循环,不能观察从距离观察路线的起始状态 $a-1$ 或超过 $a-1$ 个状态开始的循环,也不能观察任何其长度加上到起始状态的距离为 a 或超过 a 的循环。

1. 观察直径与行为空间大小

为比较观察直径和行为空间,考虑将行为空间中的 2^N 个状态,按在直径为 1 个单位的圆上均匀分布 10 000 个状态的密度,置于一个圆盘的边缘,这样,可以把观察直径想象为硬币的大小。按这个比例计算,100 个元素的网络的行为空间的直径大约为 286 000 000 千米——差不多是地球绕太阳运转的轨道半径。因此,对这个网络的行为的实验研究就有像在长度为几百万千米的地毯上扔几把硬币,然后根据在硬币下所能看到的,试图来描述整块地毯的外观。显然,如果能看到很少的一些图案,也不过是地毯的一个微小部分。

现在,将网络大小扩大 10 倍,达到 1000 个元素。则所有 2^{1000} 个网络状态需要直径大约为 3×10^{131} 光年的圆盘才能容纳得下。这个长度是不可思议的,它比宇宙的直径还要大。因此,网络大小对行为空间大小的影响可以说是惊人的。由于观察直径相对有限,所以对哪怕是适中大小的开关网络的实验研究也会受到限制。我们只能检验行为空间中的一个微小部分。这样,在我们的“硬币”下没有发现循环就不足为奇了。即使发现了循环,这只能说明行为的局部。

2. 初始状态

仿真行为的过程需要为每个被观察的行为序列选择一个初始状态。这意味在选择初始状态时利用某个准则是合适的。若建模情境中指出存在对初始状态的不确定性,则我们认为有必要使用初始状态的一个恰当的整体。

考虑开关网络的任意行为: 2^N 个网络状态自然地分成不同的组,每组

状态对应一个不同的循环,称每个组为一个支流。每个支流包括一个循环以及进入这个循环的所有状态(即 run-ins)。

由于开始一个在给定支流中的观察路线的概率显然与支流中的状态总数有关,如果等概率、独立地选择初始状态,则所有被观察的行为特性(比如循环长度的出现率)与支流大小有关。这就说明,使用典型的初始状态整体,我们没有等概率地选择循环或循环长度,而是趋向于观察较大支流的循环。因此,我们得到的是被支流大小加权后的循环长度的出现率。还注意到,即使检验局部循环空间的结构,例如检验循环的稳定性,由于循环一般不是直接选择的而是通过初始状态得到,因而我们检验的实际上是更容易发现的循环的局部结构。

当然,如果这种特别“平凡”初始整体(等概率、独立地选择网络状态)符合建模情境,那也是可以使用的。这就是那些被建模的实际系统可以从它的行为列表中任意一点开始的情境。需要指出,常常有些建模情境不需要这种初始状态整体。为了将由平凡初始状态整体产生的行为数据用于与其不符合的建模情境,我们需要把支流大小的影响考虑进去。

3. 确定循环长度和进入循环 run-in 长度

我们总是假定确定循环长度和 run-in 长度的数据是一条行为路线——一个从某个初始状态开始的经过仿真计算到最后一个状态的状态序列。两个基本问题是:需要计算多少个状态;如何从行为路线中确定是否存在循环。在寻找循环时,我们只考虑直接比较状态的方法。

本节考虑两种方法。它们都需要利用最后一个计算出来的网络状态,因为在行为路线中重复最后一个状态是存在循环的充要条件。如果在路线中存在一个循环,则路线中将重复最后一个状态;如果最后一个状态重复了,则可在行为路线中发现循环。

第一种方法是“直接检索”,它每次计算出一个网络状态,并检索行为路线中先前计算出的所有状态,看是否有与当前状态相同的。这个过程最小化了发现循环所需要计算的状态的数量,但浪费了花在检索上的时间。第二种方法是“延迟检索”,它先计算出预定数量的状态,然后检索是否存在循环。这种方法用在发现循环上较合适,但它需要计算出大量的网络状态。我们使用的方法结合了这两种方法的长处。

注意到在检索重复状态时,至少有两种使用最后一个状态的方式:可以将最后一个状态与第一个状态比较,再依次与其后的状态比较;也可以将最

后一个状态与其前面的一个状态比较,再沿着行为路线一直比较到第一个状态。这样,就有四个过程:直接检索,前向和后向;延迟检索,前向和后向。

5.3.3 开关网络模型的应用

5.3.3.1 复杂组织中的战略管理

为了用开关网络建模,我们需要建立网络和真实世界在这两种描述上的对应联系。我们将在管理学领域讨论网络模型的实际意义。

将开关网络解释成嵌入组织内部的一个控制系统。网络元素对应组织内部使用控制信息的点。网络结构表示系统中实际控制信息的通道。用布尔函数来描述控制点对由信息源引起的偶然事件的反应。将输入信息和元素的反应分成两类限制了开关网络模型所能应用的行为的范围。大量的过程由是一不是,开一关,合格品一次品,去一不去等决策控制。此外,对其他决策可以由 n 进制开关网络模型来描述。

更准确地说,如果行为是一个生产过程,可将网络中的元素看成是机器。 N 台机器表示 N 个不同的组成部分,每个零件或是制造好的或是未制造好的。循环相当于生产,循环前面的瞬时态相当于启动阶段,全体循环的集合给出了特定的控制结构和特定的组成部分集合能够生产的全部产品的清单。

在许多开关网络建模中,系统大小(规模) N 一般比较大(在遗传应用中至少为 10^4 或 10^5 数量级),而在本例中 N 至多为 10^2 数量级。但是,相对小的系统并没有消除系统的复杂性,尽管组织的控制栅格(组织的功能结构)可以被固定和详细说明,但是了解它的细节以便对系统反应做出预测的时间往往超出了预测所需的时间。因此,有效的管理实践需要大量在结构不确定的条件下进行预测。一种适应不确定性的方法——整体建模方法——是研究结构的适当整体,把分析的兴趣重新集中在产生的结构的行为性质上。

布尔函数是一个关键的概念。管理战略是为了达到某些组织行为而进行的管理实践,它相当于在开关网络模型的布尔函数集合上施加限制,更准确地说,一个组织能够存在下来,并在某些情形下取得成功的事实,说明单个过程的完成往往不需要大量的时间。换句话说,对于一个成功的组织,重复行为必须在“合理的”时间周期内完成。因此,如果我们的网络是表示现实组织中的有效模型,则它的循环长度也应该是“合理的”。如 N 等于 100,而且网络是没有施加控制的,则循环长度的数量级为 2^{100} 约等于 10^{30} 。在任

何关于网络状态转移速率的合理假设下,这种网络只能对没有重复的真实世界的现象进行建模。因此,我们必须对作用在网络元素上的布尔函数施加控制来明显地缩短循环长度。

我们的管理模型的主要特性是可预测性。重点放在控制重复的组织行为的问题上,将组织的控制系统看成是处理信息的结点集合,结点被传递信息的通道连接起来。用开关网络来近似这种聚合体。虽然部分解释只是一种说明,重要的是我们希望用这个模型来演示给定建模背景后理论的构建是如何进行下去的。模型中,管理者只允许对某些小规模的性质施加控制,尤其是(1)网络中结点的输入数量;(2)为网络元素提供映射的函数类。这些(等价)类可看成是管理战略或管理形式,并比较它们与某些认可的管理方法的相似之处。

将开关网络看成是嵌入组织内部或其一部分的控制系统,在一个组织内也可以有多个控制系统。网络元素对应组织内部使用控制信息的点。网络结构表示系统中实际控制信息的通道。用布尔函数来描述控制点对由信息源引起的偶然事件的反应。

在建模方法用于形式化和扩展管理理论某些方面的方式上,需要说明两点:(1)可用整体来表示管理者管理复杂组织的观点;(2)有可能直接地形式化某些管理战略或管理形式,如可以将它们形式化为类似控制系统单元的函数。

5.3.3.2 生物学建模

分子生物学在发现控制单个或一小群基因表现的方法上取得连续性的突破,提出了如何发现细胞控制系统的大规模组织和动力学行为的性质的问题。生物学家开始考虑是否有某种系统的方式,根据目前的知识来猜测大的基因系统可能的组织形式,我们能在多大程度上了解细胞控制系统。

在一个高级后生动物中,基因的数量大约为40 000~1 000 000个。我们不可能从中发现所有的控制关系。因此,应该考虑构造细胞控制系统结构图的方法,而不用知道它的全部细节。一些已知的细胞动力学性质可能反映了细胞控制系统的总体组织形式。其中有:(1)在任何组织内,必须限制对应任意一种细胞类型的基因行为模式,由相对少量的基因行为组合而成;(2)任何组织有特定数量的稳定的细胞类型;(3)在个体发育过程中,任何细胞类型直接分化成较少的其他细胞类型。

一种方法是描述细胞控制系统所有已知的小规模性质,例如说明控制

任何过程的变量的数量、控制过程的变化影响以及被控制过程的方式等。这些小规模的局部性质在以下两个方面有用：

- (1) 局部性质为对更大规模控制回路构成的假设提供依据；
- (2) 可以推测细胞控制系统的大规模动态行为的小规模性质的内涵。

通过构造一个所有可能的大规模控制系统的集合(或整体),其中每个成员只使用了这些小规模的性质,我们就可以系统地利用这些局部特性。这个集合表示关于细胞控制系统总体结构的一类假设。通过对整体成员典型的大规模动力学行为的检验,我们就可知道具有小规模性质的细胞控制系统的最可能的大规模行为。描述小规模性质和构造可能的控制系统整体的主要目的,是为了检验已知的小规模特性在大规模性质上的内涵。

在遗传控制系统建模中,考夫曼的遗传模型的目的是为了说明小规模性质的变化如何影响大规模行为。如果某些小规模性质生成的系统的大规模行为(或结构)与真实世界相吻合,在大规模特性不确定的情况下,这些小规模性质对系统行为提供了较好的解释。因此,我们将(从外行的观点)描述模型和“真实”世界的联系,试图说明这些联系。

首先,生物学上的观察与模型的结果存在某种静态联系。例如生物是由成千或成百万个化学物质相互作用形成的复杂网络,而网络是建立或控制生物系统的通用模型;一个基因说明了一种蛋白质,蛋白质可以控制其他基因的输出率。基因的产物“激活”或“抑制”其他基因的产物,而基因的影响是确定的,可以链接起来,一个开关模型基因是切合实际的不连续的基因行为;基因之间相互作用的限制方式是复杂的,而模型基因网络可以有复杂的反馈结构;一个给定基因的产物影响确定的基因的行为,而网络结构一旦给定就固定下来;遗传系统的运行可不需要外部信息,而网络可以是自治的;生物遗传反应网络中的基因对控制它们的基因的反应不是全部相同的,而网络应该是函数非齐次的;实际的基因系统分别位于细胞内,细胞中的基因在给定时刻的产物的状态描述了细胞的生物化学状态,而给定时刻的网络状态表示基因系统的状态和细胞的生物化学状态;基因的数量在生物学上是一个重要的变量,而若 N 表示模型基因系统中基因的数量,则 N 是一个主要的建模变量。

其次,生物学背景与模型整体存在某种整体联系。例如遗传系统中的大规模结构是未知的,而输入被随机地连接到输出元素(标准整体);遗传系统中基因行为的特征是未知的,而网络元素的映射是随机选取的(标准整

体);实际的遗传系统“开始”的环境是未知的,而网络行为路线的起始状态的选取是随机的(若已定义了起始的情况,则不能这样选取),在行为空间任意一处开始至少可以发现模型系统行为的某些方面。

第三,生物学上的观察与模型解释存在某种行为或动力学联系。例如细胞类型是遗传系统不同的、稳定的产物,而循环对应于细胞类型。

受限网络是指低入度($k < 4$)或至少有 60% 的元素有一个强制输入的网络。考夫曼发现了生物学数据与受限网络模型存在某种联系。例如,在受限网络中,循环一般较短,在非受限网络中,循环通常很长,从而失去了生物学意义,而在生物学数据上,与潜在行为相对比,细胞类型必须表示基因行为大量的受限模式;在受限网络中,行为空间中循环的数量大概以 $\sqrt{N}$ 的速率增加,在非受限网络中,循环的数量以 N 的速率增加,而在生物学数据上,组织内细胞类型的数量以基因数量的分数幂的速率增加;在受限网络中,循环对扰动稳定,非受限网络却不行。而在生物学数据上,细胞类型显示自动动态平衡;在受限网络中,经过小的扰动后网络只进入较少的相邻循环中,非受限网络却不是这样,而在生物学数据上,几乎所有组织内,没有细胞类型直接分化为多于 5 个或 6 个其他的细胞类型。

第6章 系统的自组织

自组织是系统科学的一个重要概念,它是复杂系统演化时出现的一种现象。在本章,作为概念,我们分析其与他组织的联系与区别,作为复杂系统演化时出现的现象,我们讨论自组织过程前后系统状态的特点,分析如何用有序、无序来标识它们;我们讨论研究自组织现象的理论——自组织理论,我们也对自组织现象进行分类、规范,以使我们系统演化中的这类新的现象有一个全面、准确的了解。

6.1 自组织与他组织

6.1.1 组织

组织指“按照一定目的、任务和形式加以编制”。组织是一个过程,在系统科学中,系统的演化是系统的一种主要行为,组织属于一类特殊的演化过程,如把同学组织成一个球队、组织一次活动等,都是学生系统的一种演化形式。同时,我们把组织过程所形成的结构也称为组织,如民兵组织、团队组织等。通过对大量事例的分析,我们可以体会出组织过程和形成的结构(组织结构)具有以下特点:

(1) 组织结构相对于组织前的状态讲,其有序程度增加,对称性降低。原来堆积在一起的砖头,杂乱无章,当砖头被“组织”起来,形成一座房屋后,其排列分布情况发生变化,砖头之间相互位置关系确定,规则的程度增加,成为有序状态。人员组织成一个团队,不仅个体位置排列发生变化,有了前后、左右次序上的差别,而主要是相互关系发生了变化,有了上下级关系、服从领导关系等。组织的这一特点明显地体现在组织过程形成的事物中,也称为组织结构。在系统科学中,我们将这种结构统称为有序结构,它与在系统科学中讨论的系统状态的有序、对称性等性质可建立对应关系,这样就可以从系统科学角度,从状态有序无序变化来分析组织结构。

(2) 组织过程是系统发生质变的过程,是系统有序程度增加的过程。通常系统演化存在两种方式:一种是量变方式,系统的状态随时间连续逐渐的变化,当时间间隔无限小时,两个状态之间的差别也无限小;对于可以用

某种函数关系来描写状态随时间变化的系统,在量变过程中,描写状态随时间变化的函数关系形式不发生变化。另一种是质变方式,系统状态发生突变,突变前后状态变量的个数、状态变量的形式等都可能发生改变。组织过程的前后,系统状态发生质的变化,组织过程就是一个质变过程。当采用演化方程描述系统演化时,对组织过程的讨论,也可以分析系统的演化方程。但在利用演化方程分析系统组织的过程时,通常无法采用分析其演化轨道的方法,而是对方程进行定性分析,讨论方程解的个数、状态的稳定性,讨论参量变化如何影响系统状态稳定性发生变化等。

在实际讨论中,组织现象有多种形式,各种人类社会组织、经济组织是组织,而蚂蚁、蜜蜂的社会组织,生物链组织,甚至地球围绕太阳的旋转,沉积岩浆凝固形成的花样等也全是组织,他们都具有组织的特点。进一步对组织过程分析,人们发现,可以将它们分成两类。一类是系统之外有一个组织者,整个系统的组织行为和做法按照组织者(外界主体)的目的、意愿进行,在组织者(外界主体)的设计、安排、协调下,系统完成组织行为,实现组织结构。平时所讲的组织多是这一类,如人工制造的各类机器、电子设备,设计的各种结构等,通常称为他组织。还有一类,我们无法在系统外找到组织者,实际过程是在一定的外界条件下,系统“自发地”组织起来,形成一定的结构,如蚂蚁、蜜蜂的社会组织,生物链组织等,称之为自组织。

6.1.2 他组织

他组织必须要有一个系统以外的组织者,通常事前有一个目标,有预定的计划、方案等,组织者组织系统使其按事前确定的计划、方案变化,达到预定的目标。他组织现象中组织者与被组织者的关系就是一个控制、管理的关系。他组织过程与控制是紧密相连的,或者说它们是对同一问题从不同角度进行分析。通常他组织是强调被控制对象即系统的行为,强调系统对组织者的响应,研究系统状态发生质变的过程,质变后与质变前有哪些区别等。而控制是强调组织者的行为,讨论如何才能使系统发生变化,控制者的输入怎样影响系统的输出,输入输出的关系等。在具体讨论中,我们通常把一个“死”系统(系统中不包含人)的控制(组织)过程称为控制,这里的系统多是人造的机械、设备,采用的方法、理论多为工程控制论。对于包含人的“活”系统,其控制(组织)过程称为管理,采用管理科学的方法、理论,如对学校的管理、对工厂产品的管理等。实际上在系统科学中对“控制”与“管理”可以有同样的处理方法,它们都是研究组织过程中组织者与被组织者之

间的关系。研究组织者如何对系统(被组织者)输入物质、能量、信息;系统(被组织者)如何响应、如何对输入的物质、能量、信息作出反应;组织者如何排除被组织者所受到的其他干扰,使系统更准确、更迅速地达到预定的目标等。控制作用强调组织的目的,控制是指驾驭过程,它研究如何构建系统机制,如何输入信息使系统按照既定的目标演化。控制过程存在一个外界作用,即控制作用;还存在一种响应机制,即在控制作用下系统的变化如何。一个火炮就是一个很好的他组织系统,指挥员根据敌机的数量、速度,控制、操作火炮的角度、方位。控制就是研究如何选择控制作用,以及在一种控制作用下系统的响应机制是什么,在这两者的共同选择下使系统达到我们的目的。在一个系统变化的过程中,控制主要研究使系统变化的条件,研究在某一种外界条件下,系统会发生怎样的变化。

在研究控制作用时,需要区别自然界的控制作用和人工控制作用。自然界的控制作用实际上就是我们所发现的系统与外界环境之间的各种因果关系,如外力的大小、方向、作用点控制了系统的机械运动(牛顿第二定律);天气的情况控制着农作物的生长,决定了当年的收成;地球上的环境决定了各地不同的物种。在很多情况下,自然界控制作用不作为控制问题进行研究,人们研究自然规律,就是对它们进行讨论。

人们更关心的是人工控制现象,现在所讲的控制也多是对人工制造的机器、设备如何进行控制。控制现象决定于两方面因素:(1) 控制的内容、控制的大小、控制的形式等;(2) 被控制对象的响应机制。人工控制就是研究在一定目的之下,如何设计制造系统即选择什么样的响应机制,再给出什么样的控制作用,能够使系统达到我们的目的。第二次世界大战以后,人们不仅在各个领域制造了大量的可以很好控制,使之达到我们既定目标的系统,如导弹、汽车等,也建立了相应的理论——控制论。控制论是一门从数学关系上研究机器内部、动物(包括人体)内部控制一般规律的学科,它着重研究上述过程中的数学关系,而不涉及内在的物理、化学、生物或其他方面的现象。通过控制论的研究,使生产自动化和国防科学等进展到更高阶段,并促进仿生学的发展。第10章将对各类系统如何控制以及从中发展起来的工程控制理论进行专门的充分论述,这里不再赘述。

这里我们要特别提出反馈这一概念。在一个控制系统中,将输出信号的一部分作为输入,再来控制系统的输出,称为反馈。换句话说,就是把表征行为结果的量变成进一步行为的原因。从反馈结果来看,可以分成正反

馈、负反馈两种。正反馈的作用是使系统输出越来越大,礼堂里开会时扩音设备的尖叫就是典型的正反馈例子,扩音后从喇叭发出的声音,由于某种原因,反馈到话筒,再进行扩大,不断重复反馈,形成尖叫。负反馈的例子更多,人的神经调节控制系统是一个很好的负反馈系统。当我们看着去拿一个茶杯,眼睛把手与茶杯的距离作为信号输入神经系统,再控制手的动作,使之与茶杯的距离越来越小,最终拿到茶杯。在讨论系统演化过程中,反馈是一种重要的机制,正反馈是系统的激励机制、信息的放大机制。负反馈是系统的抑制机制、稳定机制、信息的衰减机制。从反馈的实施形式来看,反馈又可以分成开环控制和闭环控制两种。闭环控制指反馈控制回路与外界无关,输入的反馈信号,仅由系统的输出决定。在电子线路中的自激振荡部分就可以看成是一个闭环正反馈系统。开环控制是指输入的反馈信号,不仅由系统的输出决定,而且还与外界有关。经常研究的控制系统是开环反馈控制系统,就是讨论当环境变化,系统偏离目标时,将输出信号与目标信号进行比较,作为反馈信号,再输入控制系统,使系统仍能向原来既定的目标演化。

6.1.3 自组织

自组织是客观世界存在的另外一类组织现象。在系统实现空间的、时间的或功能的结构过程中,如果没有外界的特定制约,仅是依靠系统内部的相互作用来达到的,我们便说系统是自组织的。这里“特定干扰”一词是指外界施加作用、影响的形式、特点与系统所形成的结构和功能之间存在直接的联系。自组织指系统形成的各种结构并非是外界环境直接强加给系统的,而外界是以非特定的方式作用于系统。从效果上看,自组织与他组织现象一样,都是系统达到了一定的目的,都是实现了某种确定的状态。而它们之间的根本区别在于:同样对于系统新状态的出现、新功能的形成、一定目的的达到,其原因不同。对于他组织,出现这些现象的原因在于系统之外,比如导弹运行的准确程度在于设计人员的工作,民兵组织的形成在于上级的安排;每个班多少人、谁是班长完全是上级(外界)指定的。自组织则不同,所以出现组织结构,其直接原因在于系统的内部,与外界无关。如物种的进化,它是由系统内部的遗传和突变功能造成的。

当然,一个系统必然与外界联系,每个系统的演化也都是在一定外界环境中进行的。仅从系统组织起来的原因是外界提供的还是内部产生的,来确定系统是他组织还是自组织,是不够的。可以说,内因决定了系统演化

(发生质变)所得到组织的形式、状态的性质特点等,外因决定系统组织进程能否实现。哲学上将此说法规范为:“外因是事物变化的条件,内因是事物变化的根据。”^[1]没有适当的温度,鸡蛋不能变成小鸡;各种条件都适合,也不能使石头变成小鸡。孵化出来的是小鸡,还是小鸭,由蛋的性质,即系统的内因决定;能否实现孵化,由适当的温度,即系统的外因决定。这些浅显的例子告诉我们,外因和内因两者缺一不可。正如同上面我们在谈系统他组织(控制)时,不仅谈到外界控制,还谈到系统响应一样,控制与响应共同决定了系统的性质,也就是需要同时考虑外因、内因两个方面;在自组织问题上,也要研究系统内部机制,还要分析外界条件,同样是外界条件与系统机制共同决定了自组织系统的性质。从这个角度上看,区别他组织与自组织并不是一件容易的事。另外,系统科学告诉我们,系统和环境的划分是相对的。一个问题中某种因素,在这种系统中它是内因,而在另一种系统划分下,又可以是外因。决定系统演化的因素被划在系统之外,外因可以看成控制,看成控制就可以运用他组织的理论进行分析;将控制系统演化的因素划在系统之内,若研究内因之间的关系,则需要用自组织的理论来分析。

在讨论问题时,由于系统的划分不同,影响系统演化的原因可能是外部环境,也可能是内部因素,这就进一步决定我们选择他组织理论,还是选择自组织理论。因此,我们在区别他组织和自组织时还有一重要的根据,就是把能够通过简单的分析,找出某种因素对系统演化有影响,并可确定相互之间控制与响应的关系,通过划分系统与环境,则将此因素划在系统之外,看成他组织系统。如天气的好坏控制了庄稼收成的高低,飞行员控制了飞机的飞行等。对于无法找出外界的环境条件如何影响系统组织状态的出现,无法分析相互之间的控制与响应关系,则把该因素或者划在系统之内,或者当成某种外界条件,此时称为自组织,如贝纳尔对流。贝纳尔对流是指1900年法国青年物理学家贝纳尔在其博士论文中公布的如下实验:取一薄层流体(如樟脑油),上下各放置一块金属平板以使其温度在水平方向上无差异。从下对流体加热,下上两平面温度分别记为 T_1 、 T_2 。未加热时,系统处于平衡态,各处温度一样,流体内分子作杂乱无章运动,系统在水平方向上是对称的。刚开始加热,上下温度梯度不大,从下向上的热量流与温度梯度力之间为线性关系。系统内分子仍然作无规运动,热量的传递是依靠杂乱无章运动的分子相互碰撞来实现的。在水平方向上仍然呈现为高度对称性的无序状态。继续加热,流体在竖直方向上温度梯度加大,系统相应的热

量流加大,逐渐远离平衡态,处在非线性区。在温度梯度大到某一阈值时,系统性质发生突然变化,依靠分子碰撞传递能量的无序状态消失,系统呈现出规则的运动花样,所有流体分子开始有规律地定向运动,水平方向上的对称性受到破坏,从侧面看过去如图 6.1.1 所示,形成一个个环,有人形象称之为贝纳尔蛋卷;从顶面向下看,则是一个个正六边形,相互挨在一起,流体从六边形中心流上来,又从六个边流下去,如图 6.1.2 所示。² 诚然流体上下温度差的大小,确实是我们看到系统出现贝纳尔图样的条件。但上下温度差在水平方向上是无变化的,这一水平方向上无变化的温度差,如何造成了在水平方向上流体微团的不同运动情况,是不能解释的;而且外界“控制”,使系统上下温度差是逐渐变化的,在温度差变化初期,系统状态无任何改变,而在到达某一温度差临界值时,系统状态发生突变,这也使我们无法分析“控制”与“响应”之间的关系。对这种“控制”下系统的演化我们仍称为自组织。在这种情况下,外界作用不称为控制,而称为实现自组织的条件。市场经济中由“无形的手”造成的市场均衡情况也应看成自组织的现象。

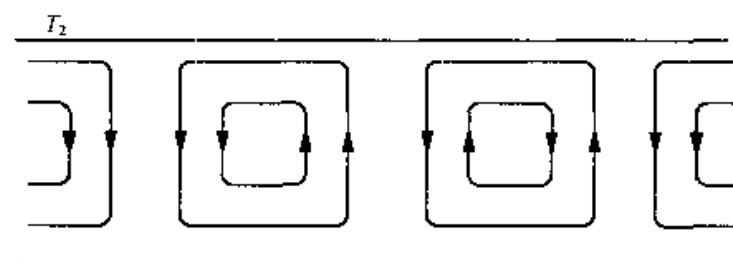


图 6.1.1

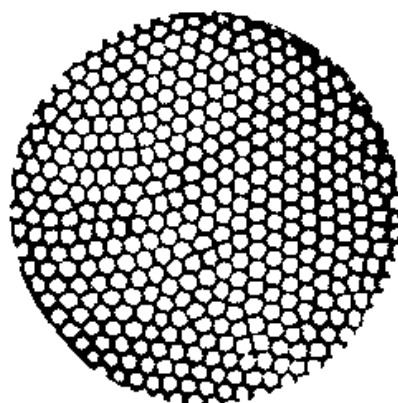


图 6.1.2

在自组织现象中,由于外界控制条件与系统自组织机制之间关系不易分析清楚。因此在选择讨论对象上,自组织与他组织现象相反,他组织多是针对人工系统,按照了解的控制与响应的关系,研究如何建造系统,使之具有某种功能、响应机制,再分析如何输入,使系统在该输入下,完成预定的任务,达到给定的目的。在自组织理论中,不分析系统控制与响应之间的关系,且多讨论自然界中的自组织现象,而对人造系统的自组织现象讨论较少,特别是理论研究成果更少。

当然,现在人们讨论的自适应的学习系统可以看成是自组织系统。但是对于自适应学习系统,人们仍然用他组织系统的观点来进行设计与研究。如从输入输出关系来研究自学习系统的演化特点,当自适应学习系统在受多次刺激以后,其响应机制发生变化,系统可呈现出在学习过程中多次强调的状态。自适应学习系统的演化是一种自组织,也可以说是一种他组织,只是这种他组织的一次反应行为与多次反应行为有区别而已。

客观实际是统一的,自组织和他组织都是对在一定外界环境下系统状态发生质的变化这样一类现象的两种不同描述方法。严格地说,自组织与他组织是我们在研究方法上对系统的一种分类,将系统列到不同的范围内,采取的办法也不同。同一个现象,我们既可以说它是自组织现象,又可以说它是他组织现象。把它看成自组织现象,就利用自组织理论来处理,如果看成他组织现象,就利用组织理论(控制理论)来处理。

从目前来看,我们将能够分析出外界控制与系统响应之间关系的系统,称之为他组织系统;无法说清楚关系的系统,我们称为自组织系统。按此观点,有些现在看来是自组织系统,将来可能是他组织系统。或者更准确地说,有些现在用自组织理论处理的现象,将来可能会用他组织理论来处理。对于贝纳尔对流系统,将它作为自组织的典型实验,已在不少著作中进行过讨论。最近,也有人将它作为一个组织问题,利用流体力学的纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equation)进行分析,已经得到了很好的结果。

也有人把输入、输出关系已经确定的系统称为他组织系统。对于这样的系统,有一定的输入,根据系统确定的响应关系,就可以得到系统预想的输出行为。机床根据事前输入的数据,可以按要求“自动”切削出合乎条件的部件;火炮根据输入的信号,自行瞄准、打中目标,这些都是他组织系统。同样,将输入确定,输出行为不确定的系统称为自组织系统。对于贝纳尔流体系统,虽然确定的温度差可以使系统一定出现花样,但花样出现的位置却

是无法预见的,在空间某一位置上,流体微团可能向上运动,也可能向下运动,这样无法确定输入输出关系的系统,则是自组织系统。

自组织是系统存在的一种形式,在研究系统与环境关系时,我们发现它也是系统存在的一种最好形式,是系统在一定环境下最易存在、最稳定的状态。因此即使对于那些可以当作他组织研究的系统,我们也应该使其达到自组织状态。对于生态系统,我们不能人为“组织”,破坏生态平衡,大量围湖造田,把湖边沼泽“组织”成良田。这样破坏生态,就将造成环境恶化,危害人类。我们要维持生态平衡,不过量采伐树木,使之可以自我繁殖;不大量产生工业废气,保护地球表面臭氧层等,使其达到自组织状态。现在人们已经意识到使自己的行为限制在生态系统的自组织范围内活动。在经济系统中,我们也不能随心所欲地组织生产、安排经济活动,必须符合经济规律,这就是要求使经济系统处在自组织状态。

6.2 两种有序原理

6.2.1 序的一般概念

序是一个很普通、很常用的概念。对一个班级的同学,可按身高排定先后次序,也可按体重排定另一次序。按某种规定对多数个体进行排队,称为排序。《辞海》中给出,序是“按次第区分、排列”,指次第,第次其先后大小。自然科学中,序实际上就是对两个元素之间关系的确定。针对这一本质,数学上严格定义了偏序(即是我们通常所讲的序),认为它是一种具有传递性、反对称性和自反性的二元关系。这里的偏序关系是我们下面讨论的基础。可以理解为,子系统之间有偏序关系的两个系统可以比较其有序程度,不存在偏序关系的系统,不能比较其有序程度。后来人们进一步发展用有序、无序来描述客观事物的状态、来描述具有多个子系统组成的系统的状态。所谓有序,指事物内部的诸要素和事物之间有规则的联系或转化;即在系统内子系统之间存在某种类似数学的偏序关系,比如一队排列整齐的上兵,每两个士兵之间都存在偏序关系,我们则称这队士兵处在有序状态。反之,所谓无序,指事物内部诸要素或事物之间混乱,且无规则的组合,在运动转化上的无规律性。同样一队士兵在随意休息或自由活动,每两个士兵之间不存在偏序关系,则称此时系统处在无序状态。单个要素或单个事物在相应的层次上不存在联系或排列,是无所谓有序或无序的。晶体空间点阵上原子(或离子)有规则的排列,行星围绕恒星有规律的运动,原子中电子有规则

的分布在不同能级壳层上,人体的各个器官有规则地分布在人体不同位置、具有不同功能、相互配合完成人体新陈代谢的任务,我们说这些是有序的。反之,无序的状态或运动很难加以描述或区别。例如两块橡胶的差别是需要对每块中的各个分子都作了描述之后才能确定的,这是由于橡胶的分子排列是无序的,而对于两个晶体则只需指出它们的晶格常数就可以确定它们之间的差别。因此有人把序看作是宏观可辨认的量度,认为只有有序的现象在宏观上才是可以分辨、可以认识的。在研究事物时,总是找到事物内部诸因素之间排列的序,并按某种序来确定一事物与它事物之间的关系。从这里我们看到,有序概念是利用数学上偏序关系来区别两个系统或两个事物之间的差别,子系统之间具有某种偏序关系的系统,可以认为是有序的;子系统之间不具有偏序关系的系统,认为是无序的。

在理解序概念时有几点需要特别加以注意。

(1) 有序、无序是对比较而言的,只有一件事物,某事物中仅包含一个元素,都是无法谈论有序或无序的。序是指多个事物的一个比较,我们讲某个状态是有序的,一定是相对另一个状态而言的,是两个状态比较而言的。绝对的有序或无序是不存在的,A 相对 B 来讲是有序的,但 A 相对于 C 来讲可能就是无序的。当然,在被比较的事物或状态是显而易见且不会引起误会时,可以省掉被比较的事物或系统,而只谈某事物或某系统是有序的。比如我们讲晶体是有序的,虽未指出相对于谁,但通常是相对于玻璃、橡胶等物质而言的;我们讲一队排列整齐的士兵是有序的,是相对于士兵休息、自由活动来讲的;我们讲一个人的工作安排是有序的,是指各项工作进行的先后次序有确定的安排,相对于各项工作随机安排来讲的。

(2) 两个事物相比较谈论有序、无序总是根据某一规则的,规则确定以后才能将事物按规则排队,也才能确定其有序、无序。确定的规则不同,其有序、无序程度也可能是不同的。例如,从导电性上来看,铝是导体,锗是半导体,氮气是绝缘体,将铝、锗、氮气三种物质如此依次排列,是有序排列;从密度上来看,锗最大,铝次之,氮气最小,再将铝、锗、氮气三种物质依次排列,就是无序排列。用不同的规则要求来分析事物的有序性,可能会得到完全不同的结果。因此,我们谈论、比较两个事物的有序程度也是指按某一标准的要求来进行的。在大多数情况下,所依据的原则是大家公认的,此时也可不指出所依据的原则。我们谈论晶体有序是指按照原子(或离子)空间排列来分析,我们谈天体运行有序是指分析日出日落、四季变化在时间上有周

期变化的性质。

(3) 有序和无序在一定的条件下是可以互相转化的。有序、无序的转化也可以看成是系统的演化行为,而且是系统更高级的演化行为。一般情况下,研究系统在有序状况不改变的条件下所呈现的演化行为,通常反映事物量的变化,反映系统状态的渐变行为。而当系统演化时出现了有序、无序的转变,实际上是出现了功能、结构的变化,出现了质变。如无序的自然光在光泵作用下变成了有序的激光,呈周期规则排列的雪花在加热时,丧失了有序性成了一团无序运动的水蒸气,这些都反映了有序、无序是可以相互转化的。在讨论一个复杂系统演化时,其演化轨迹可能是很复杂的,而且不易讨论清楚,这时我们往往讨论系统有序程度的转变情况,在一个较高的层次上来分析系统的演化,从而得到具体结果。物理学中讨论的各种相变,就是研究在一定条件下系统有序、无序之间的改变及其所遵从的规律。

6.2.2 对称性与有序

有序、无序是一个较普遍的哲学范畴,有序、无序的种类也很多,可以是空间有序、时间有序,也可以是功能有序,不同种类的有序是根据不同的规则来确定的。当前,系统科学在研究系统演化时,特别是进行定量分析,主要对无生命系统的有序、无序进行分析时,是通过对称性来认识状态的有序、无序,通过对称破缺来分析有序、无序的转化。为此我们有必要对对称概念进行讨论。

对称是自然科学常用的概念,某事物或运动以一定的中介进行某种变换时,若变换后结果保持不变,则称该事物或运动在该中介变换下是对称的,否则是不对称的。对称性是人们研究、分析宏观事物时经常采用的一种手段。对称性越高的事物,越可以用较少的语言将其描述清楚。例如对正方形,只给出边长即可,而对于对称性低于正方形的长方形来讲,则必须给出两条边长。物理上对此有更明确的定义,它讨论的对称性是指如果在某种对称操作下(如沿某轴旋转 180°)系统的状态保持不变,则称系统对这种操作保持对称性,或具有该种操作的对称性。例如贝纳尔对流,在上下温度梯度未达到规定阈值时,具有水平方向上平移任何距离的对称性,在温度梯度到达阈值出现对流花样时,则仅具有平移一个或数个对流花样距离的对称性,其余对称性都失去了。系统状态发生变化时,若从无序均匀分布状态变化为有序结构,对称性降低了,物理学上称之为对称破缺。在耗散结构理论中,不论系统的有序结构如何,不论是通过外界的何种作用使之发生变化

的,我们统一用对称性的高低来表示系统有序程度的多少,用对称破缺来表示系统状态的突变。有了统一的标准,就可以比较表面上看来联系不大,甚至毫不相关的两个状态之间的有序程度及它们的“进化”关系。当然,对称破缺也限制了对一些状态之间有序程度的比较,或者说,我们比较两个状态之间的有序程度,必须要说明是在什么样的对称操作下其对称性的变化情况,不能随意比较。

最直观、最普遍的对称形式是形象对称,除了形象对称外还有结构对称。无论是形象对称还是结构对称都指空间对称。我们进行各种操作,如旋转、反射、平移等,使事物位置发生变化,若操作前后事物的状态未发生变化,则称该事物对此操作是对称的。如对一个正方形图形,进行过中心且垂直图形的轴旋转 $\frac{\pi}{2}$ 、 π 、 $\frac{3\pi}{2}$ 、 2π 后,与原来形状一样,则称正方形图形具有绕中心旋转 $\frac{\pi}{2}$ 、 π 、 $\frac{3\pi}{2}$ 、 2π 四种对称性;但对同一轴,正方形旋转 $\frac{\pi}{4}$ 后,与原来形状不再重合,则称它不具有 $\frac{\pi}{4}$ 的旋转对称,而一个圆盘则具有 $\frac{\pi}{4}$ 的旋转对称性。事物除空间上形象和结构的对称以外,还可具有时间对称。时间对称是指事物每运动变化一段确定时间以后的状态,与原来状态保持一致。系统状态若用 $f(t)$ 表示,时间对称可写为 $f(t) = f(t + mT)$,其中 m 为任意整数, T 为对称周期。时间对称通常有时间平移对称,时间反演对称等。

对称既是我们对系统状态性质的描述,又是研究系统的方法,在讨论系统状态或状态变化时,常常要分析其对称性。一般地说,具有对称性的状态可以较方便地进行描述,时间上的对称性又可以使系统演化轨道变得简单。特别是,在系统演化过程中若它具有有一种对称性,则对应着系统满足一种守恒律。对物理系统,可以有非常具体的关系,一个系统具有时间平移不变,则一定满足能量守恒;而具有空间平移不变的系统将满足动量守恒,具有空间旋转不变的系统满足动量矩守恒,等等。根据系统对称性的分析,我们可以对系统性质有更深刻的认识,可以了解系统在机制上的很多特点。

在比较两个状态的有序程度时,定义对称性低的状态更有序,对称性高的状态更无序。在系统演化时,由对称性低的状态向对称性高的演化称为退化;反之,称为进化。所以这样规定,在于我们的概念是建立在热力学基础上的。按照热力学的分析,高熵状态所包含的微观态数多,即在此态中分子相互交换的可能性大。通常认为系统这样的状态更无序,其原因在于,在

这样的状态下,子系统变化可有更多的自由度,即运动更加混乱。某状态包含的微观态数多,则表明它可以在更多的对称操作下保持不变,也即具有更大的对称性,故我们用对称性多的状态来代表无序状态是很自然的,系统从无序状态向有序状态的演化是系统不断地对称破缺的过程。我们讨论的热力学平衡态是系统熵最大的状态,是最无序的状态,它所满足的对称性也最多,无论采取什么样的操作,系统的状态均不发生改变,即具有各种对称性。平时我们有一种错觉,认为似乎有序程度越高的状态其对称性也越高,比如晶体比高温下其转变成的气体更有序,且通常又说晶体有某些对称性,似乎对称性高和有序是正相关。实际上是不对的。对于晶体和其转变成的气体,所以出现对其对称性与有序性关系上认识的错误,在于既未看到气体具有更多对称性,又忽略了晶体与气体相比由于对称破缺失去了大量的对称性,仅仅保留了某些有限的对称性。通常在分析晶体时,不指出均匀气体具有各种物理操作的对称性,也不讨论晶体与气体相比失去的对称性,仅指出晶体还保留的那一部分对称性,这才给人们造成错觉,认为这部分对称性是均匀气体所没有,而晶体特有的。

有序与系统的对称性、描写系统演化方程的不变量三者之间有着密切的关系。为了进一步分析这些问题,我们从系统演化的基本问题出发。在数学上,用一组微分方程来描写系统的运动,在给定初始条件,即给定 $t=0$ 时的 $x_i(0)$ 值,可由演化方程求出系统的演化情况。

设系统演化方程组为

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6.2.1)$$

若系统存在某种对称性,则对应一个不变量,此不变量为状态变量的某种函数,

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = C \quad (6.2.2)$$

将(6.2.2)代入(6.2.1)中,可消去一个变量如 x_n ,得到 $n-1$ 维系统的演化方程组。维数降低有利于求解方程,对于一个 n 维系统如果可以找到 $n-1$ 个不变量,则可化简得到 1 维微分方程,使系统演化问题完全可解。

在力学中对称性与不变量的关系是人们比较熟悉的,在其他领域或对一般系统,上面所述:系统具有一种对称性对应系统存在一个不变量,同时系统存在一个不变量可以将其演化方程维数降低 1 维,简化了系统的演化方程,这样一些观点仍然存在。但对一般系统,不一定能比较形象地描绘出

对称性的具体形式,因此不变量的物理意义也不易说清楚。在系统科学里也要利用上述关系来分析系统的演化,我们利用系统对称性主要在两个方面:(1) 利用对称性与有序之间的关系,根据系统状态对称性的多少来判定系统状态的有序程度,再利用状态有序程度的变化来讨论系统的演化方向等问题,系统是向着有序程度增加的方向演化,还是向着有序程度降低的方向演化,这方面研究与熵概念紧密联系在一起。(2) 利用系统的对称性来求解系统的演化方程。后面我们将讲到,一个系统的演化方程可以形式地写成一个算子方程。算子对函数的作用可以看成是对系统的一个操作,系统具有一种对称性,就存在一个不变量,也就是该不变量对应的算子对系统状态函数作用后,状态函数不发生变化。利用算子方法来求解系统演化方程,就是讨论某演化算子对系统实行操作,系统状态如何变化。后面我们将此种分析思想作为一种数学方法进行讲解。

6.2.3 两种有序

仔细分析会发现,自然界和社会都存在着两种有序现象,系统科学必须认真加以区别。一块食盐晶体与同样大小的一块橡胶相比,食盐比橡胶更有序。橡胶分子杂乱无章分布,可以认为它具有多种多样的平移、旋转等对称性;而食盐晶体中的离子规则排列,它们仅保留了平移一个晶胞距离或数倍晶胞距离的对称性,食盐晶体出现了空间排列对称性的破缺。没有外界环境干扰,食盐的有序排列结构将会一直维持下去,这是一种有序现象。同时,上节我们介绍了另一种有序现象,贝纳尔图样与平静的水相比也是有序的,可以认为水分子杂乱无章分布,具有多种多样的平移、旋转对称性,贝纳尔图样仅保留了平移一个花样或数个图样的对称性。但是我们可以看出:食盐晶体的有序(或失去了某些对称性)与贝纳尔图样所表现出的有序有着明显的不同。我们将前者称为静态有序,其所形成的结构称为平衡结构;而称后者为动态有序,其所形成的结构称为非平衡结构或称为耗散结构。动态有序是系统科学更重视和更深入研究的一种有序现象。

除了上节所说的贝纳尔对流以外,动态有序广泛存在于自然界,一年四季的变化、地球上的昼夜交替、各类动植物的生长发育以及它们躯体构造的分布都是动态有序。在人文社会科学领域中也可以到处见到动态有序的例子,经济发展的周期,稳定的社会组织形式,人的思维活动,都可以从动态有序的角度分析。我们把不同领域中的动态有序现象加以总结,可以发现它们与静态有序存在明显区别。这些区别在系统科学对系统进行分类,特别

是将系统演化行为与系统内部机制联系起来讨论有着重要的意义。

首先,我们发现在结构的形式上,平衡结构是死的、宏观不变的结构,是由微观粒子(子系统)的规则排列构成的;耗散结构是活的结构,微观上每个子系统在不停地变化运动,是微观的不停运动构成了宏观上稳定的结构。平衡结构一般没有空间尺度的限制,只要在宏观范围内,一块 NaCl 晶体,当将其打碎改变尺度后,仍呈现为规则的 NaCl 晶体结构;耗散结构在改变系统尺度以后其形式会改变,就是在改变观察尺度后,也看不到原来的花样。对贝纳尔流,如果是在一个圆形扁平容器内观察,可以从顶向下看到一个一个六角形花样,从侧面看到类似于“蛋卷”的图形(见图 6.1.1 和 6.1.2)。对于方形扁平容器则只能观察到其他形式的花样。特别是当观察尺度缩小到一个正六边形内时,则只能看到流体微团的流动,而不能发现它原来结构的形式了。另外,由于耗散结构是“活的”结构,因此结构形式除了与平衡结构一样,有空间有序结构外,还存在时间结构(某个物理量随时间周期振荡)、时空结构(某个物理量像波一样,同时随时间、空间周期变化)等,比平衡结构丰富多彩。

其次,我们发现,活结构不仅在形式上与静止结构(平衡结构)不同,而且在形成机制、维持结构稳定条件上也与静止结构不同。人们对静止结构的特点是比较熟悉的,静止结构的形成需要确定的外界环境,如一定的温度、压强等,在结构形成过程中系统与环境状态参量不一致时,也与外界有能量、物质的交流,最终达到一致,不再变化,系统形成静态结构;然而一旦形成结构,则与外界再无任何交换,而且此时与外界的任何交换,只会破坏系统的结构和有序程度。可以肯定地说,只要外界环境不再“破坏”系统,系统的有序结构将永远保持下去。活结构则不然,不仅只有在系统远离平衡态,在外界环境物质和(或)能量对系统的作用下,才能使系统形成活的有序结构;而且形成结构以后,也仍然需要与外界环境进行交流,才能使结构维持下去,如果减少与外界的交流,甚至取消交流,已经形成的结构必将遭到破坏。维持一个活的结构需要“新陈代谢”,没有“新陈代谢”系统就会死亡,有序结构随之丧失。

两种结构形成的机制显然不同,物理学中讨论的一级相变(冰变水,水变汽等)、二级相变(顺磁、铁磁之间的变化等)均是对静止有序结构变化的研究,也称为平衡相变。过去我们较重视对这类静止结构变化的研究,而忽视了对活结构的研究。为了强调活结构的形成和维持需要消耗外界的物

质、能量等,普利高津形象地将这种结构称为耗散结构,并且把研究这种结构形成、演化的学说称为耗散结构理论。也可以说,耗散结构理论实际上就是讨论耗散结构产生、维持的条件、所具有形式特点及演化规律的理论。

第三,对于静止结构的系统,它的每一部分是不变的,所谓结构就是它们的一个规则排列。而对于活结构来讲,从宏观上看,系统有确定的形状、规律;然而从微观上看,子系统又是在不断变化的。贝纳尔图样是水分子微团不停运动而形成的一个宏观稳定的图形,图形的每一个局部是由保持同样运动状态的水分子逐个替代而形成的。一个动植物的宏观体形也是由细胞的不断生长、发育、死亡,而不断替代形成的。动植物的每一部分,其旧细胞不断死亡,新细胞不断成长,而在宏观上保持一定的形状。

在系统科学中,如果不作说明,通常情况下讨论有序结构是指讨论活的结构即耗散结构。在分析系统有序与无序时,人们通常考虑结构排列上的结构序以及在实现不同功能上有一定先后的功能序。在结构序上,人们经常分析下述几种有序情况:(1) 空间序,指系统或其子系统在空间分布上的规律性。任何事物都有确定的空间分布,这种分布既不是完全均匀同一的,也不是杂乱无章、随机分布的。高分子有机化合物中各种原子或离子的空间分布、贝纳尔流体中稳定的六角形空间分布花样等,这些都是空间序。(2) 时间序,指系统发展变化时,时间上的先后次序以及周期性的变化,我们称这种确定的时间进程为时间序。地球围绕太阳旋转、钟表中摆锤或游丝的运动都具有时间序。(3) 时空序,指系统在时空四维坐标系中周而复始的变化。单纯从时间或者从空间上来分析系统变化的周期性均不明显,而将时间与空间结合起来以后,则可以看到很有规律的变化。树木年轮的生长、各种波的现象都是具有时空序的例子。

目前随着研究问题的深入,除了研究结构序的上述三种形式外,还讨论功能序,或称功能结构。功能结构指系统具有某种新的功能。对于复杂的系统我们研究演化不仅关心它的演化轨迹,更主要关心它所反映出来的功能,而系统功能的发挥有时也有一定的顺序关系,例如人体四肢功能依靠脑功能来支配,大脑既支配眼睛的视觉功能,又接受眼睛提供的信息来判断外界的事物,这些都是功能序。在系统演化过程中某些组织结构没有变化或变化不明显,而其功能发生变化时,采用功能结构讨论问题很方便。例如在从猿到人的变化过程中,四肢的组织结构变化不大,而从功能上看,猿的上肢与下肢区别不大,它们都具有行走、拿物的功能,发展成为人,就使上下肢

功能出现了分工,不对称了,上肢主要用于拿取物品,下肢用于走路,可以说人的四肢出现了功能结构。当然由于数学工具的缺乏,对于这方面研究的进展速度较慢。我们相信随着研究的深入和其他学科(如数学)的发展,对功能有序或其他形式的动态有序将会有更深入的讨论。

6.2.4 有序与系统演化

由于系统的复杂性、多样性,其演化的方式、特点、方向也是多种多样的。系统的有序性不仅是我们对系统状态划分的有力工具,可以根据有序性来区别系统,对系统进行比较,论述哪些是有序的,哪些是无序的;我们还可以根据系统演化时间进程中系统有序性的变化来分析系统的演化方向。如果在系统演化过程中,随时间系统状态的有序程度越来越高,我们称系统朝有序方向演化或称进化;反之,随着时间系统朝着有序程度越来越低的方向演化,我们称退化。

经典物理学中研究了大量的退化现象,并总结发现了热力学第二定律。经研究发现:一个孤立系统在与外界没有任何物质、能量、信息交流时,系统的自发演化,总是朝着对称性越来越高、有序程度越来越低的方向发展,最终达到对称性最高的平衡态,克劳修斯(R. J. E. Clausius)给它起了一个名字,称之为到达“热寂”状态。他进一步将这一规律推广到无限的宇宙,认为宇宙也要服从这一原理,将来整个宇宙也要热寂。

实际上自然界还存在着大量相反方向演化的现象,系统演化有可能向着对称性低、有序程度更高的方向演化。达尔文(C. Darwin)生物进化讨论的几乎全是此类现象,从原始的草履虫发展到现在的高级哺乳动物,更进一步进化为人;从宇宙中的新星爆发到出现大量无机物,进而合成有机物。这些全是系统进化的表现。我们不去研究整个宇宙究竟是如何进化和退化,而是强调指出,系统科学抓住系统进化和退化两个方向作为讨论系统演化与其机制的主要内容,是完全正确的。

在统计物理中,人们建立了熵与有序度之间的关系,即系统的统计物理熵大,则其有序程度低;反之,系统的有序程度高,则其熵小。这样我们就能利用熵与有序度的关系,用物理量熵来描写系统演化的方向。热力学第二定律指出了孤立系统自发地朝对称性高、有序程度低的方向单调演化,也可以表达为:孤立系统的熵在系统演化过程中是不会减少的(有时热力学第二定律也称为熵增加原理)。在简单巨系统中我们具体分析如何建立其熵概念,进而讨论如何用熵来分析系统演化的方向。对于更复杂的系统,虽然目

前我们还没有办法建立熵概念来定量分析系统演化的方向,但是利用系统的有序、无序来分析系统的演化问题,却是定性分析系统演化的有利工具。

6.3 自组织理论

自组织理论是研究客观世界中自组织现象的产生、演化等的理论。由于自组织现象非常丰富,且它们的形成大多与系统的非线性相互作用密切相关,而目前对于大多数系统的非线性相互作用,还不能提出一种普遍适用的处理方法,因此自组织理论也未形成一种完整规范的体系,仍处于构建阶段。通常人们将普利高津创建的耗散结构理论^{3~8}和哈肯创建的协同学理论^{9~14}统称为自组织理论。耗散结构理论与协同学理论都是从物质运动的简单形式,如物理运动、化学运动等形式中总结出来的,它能够很好地解决物理学、化学中一些自组织运动的问题,比如激光、时间振荡化学反应等。但是将它推广到一般系统,作为描述一般系统的自组织理论,还有一个不断完善的过程。因此,我们在这一节介绍的,还仅仅应称为自组织理论的初级理论。自组织理论是研究解决自然界和社会现象中自组织现象的理论工具。前面我们已经讲过,一个真实客观现象往往很难区别它是自组织现象还是他组织现象。因此,按此逻辑,也就无法判断是否需要采用自组织理论。通常是,我们根据个人的思考,人为认定它是自组织现象,进而选用自组织理论进行分析;出现矛盾,其原因不在于自组织理论本身,而在于该现象可能不属于自组织现象。

6.3.1 耗散结构形成的条件

前面我们已经讲述了自组织现象,特别是讲了一个系统在自组织的过程中,有序程度不断增加,最终达到一个稳定状态,其有序程度较自组织过程初始要高,因此形成有序结构是我们关心的重点。在自组织理论研究中,我们着重分析对系统有序程度的描述,分析有序程度变化的原因、机制等。普利高津在研究了大量系统的自组织过程以后,总结、归纳得出,系统形成有序结构需要一定条件。¹⁵

(1) 系统必须开放。热力学第二定律已经指出:孤立系统的熵不可能减少。对于一个孤立的系统,其演化结果必然是达到熵最大的平衡态,物理学所讨论的扩散等现象,不论其微观机制如何,从宏观上讲,它们可以被看成孤立系统,故最终要达到平衡态。因此要想使系统朝着有序的方向发展,系统开放是必要条件。

系统开放这一条件可以更具体地从熵 S 的变化上来讨论。一个开放系统的熵改变可以分成两部分 $dS = d_i S + d_e S$ 。 $d_i S$ 表示由于系统内部原因,使系统熵发生改变的部分,与外界无关。在孤立系统中已经确认,无论系统内部发生什么变化,均有 $d_i S > 0$;对于开放系统,只要不考虑外界对系统熵改变影响的部分,仅分析系统内部机制作用对熵改变影响的部分,无论什么样的外界作用,仍有 $d_i S > 0$ 。 $d_e S$ 表示由于系统与外界有联系,所形成系统熵发生改变的部分,若与外界无联系, $d_e S = 0$,否则 $d_e S \neq 0$ 。系统与环境的关系各式各样,其对系统熵的影响 $d_e S$ 可正、可负。系统总熵变化等于这两部分之和。因此,在开放系统中只有 $d_e S < 0$,同时 $|d_e S| > d_i S$,才有

$$dS = d_i S + d_e S < 0 \quad (6.3.1)$$

整个系统的熵减少,系统变得有序,或者说,只有在这时才有可能使系统从无序状态向有序状态转化。归纳起来可以认为,系统开放与外界有物质和(或)能量交换时,由于交换使系统熵减少,且其变化数值大于系统内自发过程引起的熵产生时,整个系统的熵可能减少,系统向有序方向转化。

(2) 远离平衡态。按热力学定义,平衡态是孤立系统经过无限长时间后,稳定存在的一种最均匀无序的状态。系统离开平衡态后,状态要发生演化(变化),其演化方向是什么呢?普利高津给出的最小熵产生原理告诉我们:在非平衡线性区即近平衡区,系统演化的最终结果是到达熵产生最小的、与平衡态类似的非平衡定态,当环境使系统逐渐接近孤立系统时,此非平衡定态将平滑地变为平衡态,系统根本不可能形成有序结构。只有在远离平衡态时,系统处在力和流的非线性区,才有可能演化成为有序结构。远离平衡是系统出现有序结构的必要条件,而且是对系统开放的进一步说明。开放系统在外界作用下离开平衡态,开放逐渐加大,外界对系统的影响变强,将系统逐渐从近平衡区推向远离平衡的非线性区,只有这时,才有可能形成有序结构,否则即使系统开放,也无济于事。实际上,系统出现耗散结构的上述两个条件,是从熵改变大小与从离平衡态远近两个不同的角度,对系统进行的讨论,应该有一致的结果。

(3) 非线性相互作用。前面已经指出,组成系统的子系统之间存在着相互作用,一般来讲,这些相互作用是非线性的,它们不满足叠加原理。因此子系统在形成系统时,会涌现出新的性质。自组织理论与前面讨论一致,自组织也是系统演化涌现新性质的一种,自然与子系统之间非线性相互作用有关。这里我们还必须强调如下几点:非线性相互作用是系统形成有序

结构的内在原因,分析相互作用机制在建立系统演化模型中是最重要的工作,非线性相互作用在系统演化方程中体现为方程是非线性微分方程。在建立模型时,会碰到分析、讨论一些不易分清内部相互作用的系统,若能肯定系统一定会出现耗散结构,则其必存在非线性相互作用,其演化方程必为非线性方程。此时,在建立、且不断修正模型过程中,往往需要进行简化、近似,但作任何近似时,也不能用线性微分方程来表示系统的演化,这就给我们建立模型提供了可依据的原则。

(4) 涨落现象。涨落是统计物理中已经讨论过的现象,在平衡态时,系统存在涨落,涨落大小与粒子数平方根成反比,对于由大量粒子组成的系统,涨落可以忽略不计。同时,当系统由于某种原因偏离平衡态时,涨落也会使系统很快地恢复到原来的状态。涨落既是对处在平衡态上系统的破坏,又是维持系统在稳定的平衡态上的动力。在系统发生相变时涨落更起着重大的作用,处在临界点处的系统,原来的定态解失稳,但系统不会自动离开定态解,只有涨落才使系统偏离定态解,偏离范围不论多少,只要有偏离就会使系统演化到新的定态解上,因此可以说涨落是使系统由原来均匀定态解到耗散结构演化的最初驱动力。可以设想没有涨落存在,那不论在什么条件下,系统也不会自行脱离原来的不稳定的定态解,而实现新的有序的耗散结构。

涨落是随机的,没有确定的方向,没有准确的发生时间,随时都可以发生。涨落可以由系统内部引起,一个由大量子系统构成的系统,整个系统宏观状态确定以后,各子系统仍可以随机运动,子系统的随机运动造成了描写系统整体物理量的涨落;涨落也可以是由于环境的随机变化引起的,环境变量处在不停的变化当中,对系统的影响也总是在某一确定值上下摆动,最常见的是空气扰动对系统状态的影响,这就是外涨落。在实际系统中,虽然涨落在系统由无序均匀态向有序态的转变过程中起着非常大的作用,但是由于耗散结构理论讨论由大量子系统构成的简单巨系统的性质,内涨落总是存在的,总能满足系统出现耗散结构的条件,故在实际应用中并不着重讨论它。

上述这些条件是相互紧密联系的。不向外界开放,系统无法与外界进行物质、能量、信息的交流,系统就不能远离平衡态,系统内子系统之间的任何非线性相互作用也不能使系统脱离平衡态,系统的涨落也仅能起稳定系统,使之处在平衡态的作用,而无法形成有序状态。没有远离平衡态,系统

开放也是没有用的,系统仅能在平衡态附近,与外界交流也仅是类似微扰的作用,不能使系统发生本质的变化。非线性相互作用是系统内部发生质变的基础,从研究的历史来看,以前物理学是建立在线性相互作用的基础上的,系统满足叠加原理,在这样的理论框架下,系统不可能形成耗散结构,任何计算分析也无法讨论实际系统向有序结构演化的结果。涨落机制对于由多子系统组成的系统总是存在的,虽然在有关理论计算中涨落不起太大的作用,但实质上涨落是系统从一个定态解变为另一个定态解、系统发生质变的一个基础。没有涨落,其他条件再具备,系统也不会出现有序结构,而且没有涨落系统的稳定状态也不能维持;对于一个稳定的系统,各子系统之间相互作用的传递也必然会出现误差,必然存在涨落;否则,对于一个复杂系统,任何一点小的变化,不论是外界随机扰动,还是系统内部的各种误差(这对于复杂系统是随时可能发生的),都会在系统内长期存在,无法消除,使系统处于“病态”,可以说没有涨落复杂系统就不能存在。

6.3.2 自组织的状态描述

自组织系统内各子系统的状态变量很多,无法逐一加以描述,而在自组织的过程中,各子系统变量之间紧密相连、相互影响,自组织的过程就是各状态变量相互作用,形成一种统一的“力量”,使系统发生质变的过程。我们分析系统也要从这一特点出发。哈肯提出序参量的概念,为我们描述系统的自组织过程提供了方便的办法。¹⁶

通过研究发现,在描述系统状态的众多变量中,有某一个或几个变量,它在系统处在无序状态时,其值为零,随着系统由无序向有序转化,这类变量从零向正有限值变化或由小向大变化,我们可以用它来描写系统的有序程度,并称其为序参量。序参量与系统状态的其他变量相比,它随时间变化缓慢,有时也称其为慢变量,而其他状态变量数量多,随时间变化快,称为快变量。

序参量不仅可以用来描写系统的有序程度,而且在系统众多变量中它的个数比较少,系统中绝大多数变量都是快变量。在系统发生非平衡相变时,序参量的大小决定了系统有序程度的高低;它还起支配其他快变量变化的作用,序参量的变化情况不仅决定了系统相变的形式与特点,而且决定了其他快变量的变化情况,在这个意义上讲,序参量也可以称为命令参量。描写系统“有序”程度,在非平衡相变中“命令”、支配其他快变量变化,这两种意义在同一类变量上具备,也正好由一个英文单词“order”表示,称为“order

parameter”(序参量)。

由于系统的不同,系统序参量的确定、产生也不同。一些较为简单的系统,在它的各种变量当中即存在一个明显比其他变量变化慢的变量,它就是序参量,例如在研究激光系统中选择的变量有原子磁矩 P 及电子跃迁所产生的光场 E ,激光的产生及性质计算可以由 P 、 E 描写的状态来表示,而 P 、 E 两个量中 E 随时间变化慢, P 随时间变化快,选择 E 为序参量,只列出 E 随时间变化的方程就可以讨论激光系统的性质了。

另一类较复杂的系统,在描写其状态的变量中,无法区分出它们随时间变化的快慢程度,但可以通过坐标变换,得到新的状态变量,在新的变量中,可明显地看出序参量。如一个范德波尔方程系统,此系统两个变量 X 、 Y ,它们满足如下演化方程

$$\begin{cases} \dot{X} = Y \\ \dot{Y} = -X - \lambda(x^2 - 1)Y \end{cases} \quad (6.3.2)$$

X 、 Y 两个变量随时间变化的速度在同一量级,无法直接确定序参量,进行

变量变换,取 $\begin{cases} X = A \cos \Psi \\ Y = -A \sin \Psi \end{cases}$, 则(6.3.2)变为

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = \lambda A \sin^2 \Psi (1 - A^2 \cos^2 \Psi) \\ \frac{d\Psi}{dt} = 1 + \lambda \sin \Psi (1 - A^2 \cos^2 \Psi) \cos \Psi \end{cases} \quad (6.3.3)$$

当 $\lambda = 0$ 时,(6.3.3)简化为

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = 0 \\ \frac{d\Psi}{dt} = 1 \end{cases} \quad (6.3.4)$$

并得到解 $\begin{cases} A = A_0 \\ \Psi = \beta + t \end{cases}$, A 为振幅,不变化, Ψ 为相位,随时间线性变化,合起来表示一个振幅可取任何值 A_0 ($A_0 > 0$) 的周期振动。当 λ 较小 ($\lambda \ll 1$) 时,

方程(6.3.3)可近似看为

$$\begin{cases} \left| \frac{dA}{dt} \right| \ll 1 \\ \left| \frac{d\Psi}{dt} - 1 \right| \ll 1 \end{cases} \quad (6.3.5)$$

A 随时间变化慢, Ψ 随时间变化快, A 为慢变量,而 Ψ 为快变量,可以选择

振幅 A 为序参量。经过适当的数学分析,可以得到在此系统定态解 $\begin{cases} A=0 \\ \Psi = t + \beta \end{cases}$ (振幅为零的状态)失稳以后,振幅缓慢变化,逐渐达到新的稳定值,而相位解则较快变化,整个运动成为一种振幅逐渐变化的振动,最终达到稳定振动状态。进行上述变量变换,将原变量 X, Y 变为 A, Ψ ,实现了将描述系统状态变量变化快慢的分离,一个描述系统振动振幅,它缓慢地变化,另一个描述了系统振动相位,它迅速变化,使我们对系统运动看得更清楚了。

更复杂的系统,不仅无法区分各个状态变量之间的变化快慢,而且经过坐标变换也无法将它们之间的快慢变化程度加以区分,而需要另外选择更高层次的变量来作为系统的序参量,研究系统演化的情况。例如一个理想气体热力学系统,每个分子的位置、动量,以及由它们经过变换所得到的能量、角动量等均无法作为序参量,这时选择在宏观层次上的温度 T 、压强 p 等才可以作热力学系统的序参量,研究它们的变化,讨论系统演化的特点。当然 T, p 等宏观量作为序参量,它们也是由分子运动的坐标、动量等取和得到的,但它们与分子的状态变量不是一个层次上的量。

序参量确定以后,我们讨论系统的演化可以只研究序参量即可,序参量将整个系统的信息集中概括起来提供给我们,序参量给我们了解、认识系统提供了一把钥匙。然而我们看到序参量的确定并不是一件简单的工作,它需要我们对系统性质有深入的分析,确定系统序参量的过程也就是对系统进行讨论、认识的过程,而且要对具体系统进行具体分析。可以说只有确定序参量的原则,而无确定序参量的具体规范方法。

6.3.3 役使原理

在序参量确定的过程中,我们已经看到,不少系统的序参量是在自组织的过程中形成的。因此我们可以说,在系统自组织的过程中,众多变量形成某些序参量,反过来,序参量又役使其他状态变量的变化。序参量支配、主宰、役使系统状态的其他变量,它本身一般又是由系统的其他变量形成的。系统相变过程是一个由系统状态变量形成系统序参量,序参量又役使系统其他状态变量的过程。哈肯将相变过程中,系统状态变量里序参量与其他快变量之间役使、服从关系称为役使原理。我们可以用一个例子来说明这一问题。¹⁷

【例 6.3.1】 对某一个给定的二变量系统,它由两个状态变量 X 和 Y

描述其状态,遵从的演化方程为:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \alpha X - XY \\ \frac{dY}{dt} = -\beta Y + X^2 \end{cases} \quad (6.3.6)$$

若不考虑非线性项,则成为两个相互无关的方程,给定参数 $\beta > 0$, Y 是一衰减变化,随时间推移 Y 趋近零。 $\alpha > 0$ 时, X 发散,趋于无穷; $\alpha < 0$, 则 X 的变化规律与 Y 一样。假定 α 取值可正可负, β 仅取正值,这时我们称 Y 为稳定模,趋于稳定, X 为不稳定模,它的稳定性依赖 α 的正负取值。

考虑非线性项,方程相互耦合,先假定认为 X 与 t 的关系已知,对方程 $\frac{dY}{dt} = -\beta Y + X^2$ 可解出:

$$Y = \int_{-\infty}^t e^{-\beta(t-\tau)} X^2(\tau) d\tau \quad (6.3.7)$$

其中利用了初条件 $Y(-\infty) = 0$ 。为理解役使原理,我们对(6.3.7)进行分部积分,有

$$Y = \frac{X^2}{\beta} - \frac{2}{\beta} \int_{-\infty}^t X \dot{X} e^{-\beta(t-\tau)} d\tau \quad (6.3.8)$$

计算上式右端第二项

$$\begin{aligned} \frac{2}{\beta} \int_{-\infty}^t X \dot{X} e^{-\beta(t-\tau)} d\tau &\leq \frac{2}{\beta} |X \dot{X}|_{\max} \int_{-\infty}^t e^{-\beta\tau} e^{\beta t} d\tau = \\ \frac{2}{\beta} |X \dot{X}|_{\max} e^{-\beta t} \frac{1}{\beta} e^{\beta t} &= \frac{2}{\beta^2} |X \dot{X}|_{\max} \end{aligned} \quad (6.3.9)$$

在(6.3.8)中可以忽略右端第二项的条件为:

$$|X| \gg \frac{2}{\beta} |\dot{X}|_{\max} \quad (6.3.10)$$

此条件可解释为 X 变量的变化速度特别慢,称 X 为慢变量。从上述例子可以看出,若 X 为慢变量并满足(6.3.10)时,(6.3.6)中第二方程的解为 $Y = \frac{X^2}{\beta}$,这个式子可看成是对由(6.3.6)所示演化系统在 X 为慢变量时, X 、 Y 之间的函数关系。此结果也可由对(6.3.6)第二方程求定态解得出。将 X 、 Y 关系式 $Y = \frac{X^2}{\beta}$ 代回(6.3.6)中第一方程,得到单变量 X 的微分方程:

$$\dot{X} = \alpha X - \beta X^3 \quad (6.3.11)$$

这时得到 X 变量满足尖拐突变方程,容易得到结果,再利用 $Y = \frac{X^2}{\beta}$ 得到 Y

的表达式,使问题得到解决。

从例 6.3.1 中可以得出,对于由两个状态变量描写的系统,对其演化方程(二元微分方程组)求解时,令快变量导数为零,得到式子,代入到另一方程,消去快变量,仅求解慢变量方程,这种方法与直接求解方程组是一样的。将这样的方法进行规范、推广,就是快变量浸渐消去法。它被广泛用在多变量组成系统的相变问题分析中。

对于自组织过程的描述就是对于系统演化过程的分析。描述系统演化须建立一个多变量的微分方程组,其中包含有序参量时,可以应用役使原理。哈肯在役使原理数学表示分析的基础上,给出了求解系统演化方程的快变量浸渐消去法。其方法的思想基础在于系统演化过程中序参量(慢变量)变化慢,决定着系统演化进程。可以认为快变量演化快,先期到达相变点,呈现相变后的数值(新的稳定状态的数值)不再发生变化。此思想的数学体现为将演化方程中快变量的导数取为零(相应方程变成代数方程),求出快变量与慢变量之间关系,进而可以仅研究慢变量的微分方程。由于慢变量个数少,实际上可以仅求解少数微分方程,就能得到多变量复杂系统的演化结果,使工作大大简化。对于少数慢变量满足的方程,可以按照系统的性质进行分析,例如对简单巨系统,可采用下一章给出的数学分析方法进行分析。当然,由于自组织过程着重在对系统的序参量进行分析,因此在研究自组织现象时主要讨论原状态的失稳、新的有序状态的建立等问题,多采用一些定性方法,主要不讨论系统的演化轨迹。

6.4 自组织的几种形式

自组织是在一定条件下,由于系统内子系统的相互作用,使系统形成具有一定功能、结构的过程。自组织研究中最重要的是分析自组织所形成的、比自组织之前的状态更为有序的稳定状态(也称模式)的特点。特别是通过研究模式的特点,研究它与子系统相互作用的关系,使我们有可能把自然界的自组织现象人为给“组织”出来,也可以使我们深入了解系统整体性质特点与子系统相互作用之间的关系。前面对此我们已经进行过简单地讨论,那里我们主要是从有序程度上进行分析,从时间、空间、功能三个方面,将模式与自组织过程以前系统的稳定状态进行比较,通过比较得出了系统可以形成空间有序、时间有序、时空有序、功能有序等稳定状态。利用有序程度的大小,分析系统自组织过程,利用有序状态的种类,来划分系统的类型,这

使我们对自组织前后,系统的变化有了较深入的了解

然而我们知道自组织过程是一个动态过程。这个动态过程不仅表现在自组织过程前后系统状态的变化,表现为系统从一个均匀、简单、平衡的状态,转变为一个有序、复杂、非平衡的稳定状态。而且这一过程也体现在自组织过程以后,系统形成的稳定状态的特点。在多种情况下,自组织过程形成的状态也是一个随时间不断变化的状态,这种变化不同于自组织过程前后系统状态的变化。自组织过程前后系统状态的变化是有序程度的变化,是质变。物理上也称为相变。而自组织过程后所形成的状态虽然也会发生变化,但一般它不具有有序程度变化的相变特点。例如前面所讲的贝纳尔对流现象,自组织过程前(上下温度差未达到临界值),系统状态为水平方向无任何差别、上下存在温度梯度、宏观为静止的状态。自组织过程后(上下温度梯度达到临界值),系统呈现从顶向下看的六角形花样,液体从每个六角形中心流上来,再沿着六个边流下去,是一个不断流动的液体图象。此种宏观动态花样也存在变化,通常对此不再从自组织相变的角度进行分析,而是从其他,例如生物学的角度来研究

自组织现象中最常见的是生物学现象,在此我们用自组织观点研究生物学现象,不仅可以对生物学研究更加深入,而且从局部、具体出发,也有助于更全面丰富自组织理论。

6.4.1 生物学简单回顾

生物学是一门古老的学科,最初比较多的研究工作是在系统分类学方面,根据动物、植物的形态、结构、功能等特点,对它们进行分类,使人们对生物有了一个系统的、全面的认识。从系统学的角度来看,这是对系统稳定的、静止的状态进行研究,而对于系统随时间演化的特点研究比较少。19世纪达尔文提出进化论,从系统与环境关系和种群层次上对生存竞争、物种起源进行了研究。孟德尔(G. J. Mendel)等人从遗传、突变角度,在细胞层次上对生物系统进化进行分析。这些是对生物系统演化行为的最初研究。通过研究,他们得到在一定的外界条件下,利用遗传保持物种特性,使每一种生物都能稳定的存在;在不断的适应环境时种群中的某些特征得以不断巩固和强化,而一些不适应环境的特征逐渐弱化,直至消亡,这就形成丰富多彩的生物世界。从系统自身来看,每一稳定存在的物种,都有一套固定的基因。在时间演化过程中,基因不断复制,系统性质不变,子体与母体保持一致,这样一代一代演化,保持该物种独立存在下来。另一方面,在基因复

制过程中,会出现错误,即出现生物学上称之为突变的现象。基因突变的出现使生物体发生改变,发生突变的个体又会将突变后的特点、性质,再通过基因复制保存下来,逐渐发展,形成新的物种。从种群来看,由于环境也是不断变化,如地球演化过程中出现过几次冰河期。环境的变化就会影响种群,种群也要随着环境的改变而发生变化,形成新的种群。生物体就是这样在遗传、突变过程中,种群在适应环境的改变过程中,既使物种得以保持,又使物种不断发展变化,最终形成现在的丰富多彩的大千物质世界。

然而我们知道生物总是在一定外界环境下生存,生物体一定要适应它所在的环境。这就像在给定一个大气压的正常环境,水在 0°C 以下寒冷条件下,要变成冰,而在 100°C 以上高温条件下,要变成水蒸气一样。生物体在一定外界条件下生存,也要适应外界条件。系统遗传产生不变的个体,发生突变产生不同的个体,变与不变的两种个体都要接受环境的检验。不适应外界环境要求的个体必然死亡,而适应环境要求的个体被大自然选择保留下来。这就是达尔文进化论对生物个体所描写的现象。遗传、突变与自然选择的结合,构成了生物发展进化的核心内容。它们分别从生物体的内部作用和生物体的外界环境这两个方面来分析生物进化。自组织理论将达尔文生物进化行为与孟德尔遗传突变行为统一起来,形成一个统一模型,分析研究在一定条件下系统演化特点,分析演化机制和作用,并给出了定量的结果。在普利高津等人所著的《非平衡系统的自组织》一书第十三章,对此有详细的论述。那里给出了生物种群发展演化的方程,对遗传、突变等生物现象用数学模型表示出来,对模型方程进行分析,得出系统种群演化的特点。这里我们不去论述上述问题,而把注意力集中在系统自组织过程以后出现的模式上。这些模式的类型很多,作为系统理论也不去一个一个描述不同的模式,我们将各类不同的自组织进行归类,从不同角度、不同侧面突出自组织的共同特点,且又强调了自组织现象的某一方面特征。这里仅对人们常见的几种自组织形式进行说明,以利于对个别自组织现象的分析。下面讨论的几种形式,并没有严格的定义,而且不同学科也有不同说法。我们从系统科学的角度,做一大致分析。

6.4.2 自创生

自创生是从在自组织过程形成的新状态与原有的旧状态对比角度,对自组织状态的一种描述。在系统演化过程中,自组织过程类似于相变,在一定的外界条件下,系统原来无序态失稳,由于系统内子系统之间的相互作

用,自发产生新的结构和功能,相对于自组织过程前系统不存在这种状态,我们称之为自创生。比如在流体中,我们前面分析的贝纳尔对流花样,就可以看成在温度梯度达到一定临界值,在系统内出现一组新的六角形花样,就被称为系统的自创生。在生物进化中,每一新物种的出现全可以看成是自创生的例子。没有自创生就不可能有生物的进化。

自创生是从自组织过程前后状态之间的关系来分析自组织。自创生的特点在于自组织的过程中,系统出现了原来不曾有的新的状态、结构、功能,而新出现的状态、结构、功能,又不能用某种组织理论来分析它与过程前系统状态之间的关系,不能简单地利用控制响应理论找出新状态与组织者控制的关系,组织者无法按事前决定的方案控制系统,让其呈现某种特定的状态,它不能像指挥员指挥导弹一样,令其打到什么目标,就打到什么目标。对于新涌现的状态及结构特点,必须用前面所给出的自组织理论来讨论。通常只把新状态与自组织过程前原来状态进行比较,新状态与原来状态相比有序程度提高称为自创生;而新状态比原来状态有序程度降低称为自坍塌。当然在复杂情况下,人们无法用有序程度来衡量状态之间变化时,自创生与自坍塌也无法区别。

6.4.3 自复制

自复制是从在自组织过程中,子系统之间如何相互“作用”,才能保证系统形成某种新的、有序的、稳定状态的角度,来对自组织过程的一种描述,它是对自组织所形成的状态特点的一种描述。前面所讲,系统自组织过程形成的时间结构可以看成自复制的最简单情况。在化学振荡反应中,我们讨论了这类时间周期振荡的耗散结构。在丙二酸被溴酸氧化的反应中,以铈离子作为显示剂,当各类反应物浓度适当时,反应物溶液颜色随时间会出现红蓝相间周期变化。某种颜色(比如红色)的状态,每隔1分钟被复制出来一次,只要条件不变,自复制一直持续下去。前一章元胞自动机中以冯·诺伊曼方式连接的二维元胞自动机,经过几次迭代以后,就又得到一个新的图,这个图随着迭代会不断地重复出现,这是一个很形象的自复制例子。自复制是从自组织的时间过程,从系统状态之间的关系来分析得出的特点。在自组织过程中系统演化呈现出的有序状态,从时间变化分析,某一图形经过一段时间,新呈现出来的图形与原来图形是一样的,我们称为自复制。

我们讨论由多个子系统组成的系统。对于自组织过程中形成的稳定状态,从系统的层次来看,系统的状态是不变的,仍然保持原来的情况;从子系

系统层次来看,其状态又是变化的,每个子系统都在变化,有生有灭。我们所谓自复制,在多数情况下,是对系统中的子系统而言的,指系统中具有某种性质的子系统个数不因个别子系统状态的改变而改变。这就好像一个种群中某一个生物个体死亡了,又有一个同样的个体被复制出来一样,新复制出来的个体与原来的个体性质完全一样。子系统具有自复制功能,才能使系统在自组织过程中形成的有序状态得以保持下来。自复制是系统自组织过程中所形成的状态能稳定存在的原因。前面描述的化学振荡反应,也可以看成具有某种性质的离子每隔一分钟被自复制出来,从而使整个系统颜色每隔一分钟变换一次。离子的定期自复制造成溶液浓度颜色的周期变化。

6.4.4 自生长

自生长是从系统整体层次角度,对系统自组织过程所形成状态随时间演化情况的一种描述。这是对系统整体状态的分析:系统整体除了“体积”变大以外,其余形状、性质、特点均不发生变化,系统保持不变的结构、功能。体积是一个形象的比喻,生物体自身生长发育,从小苗长成参天大树,从小鸡长成大鸡,都称为自生长,尽管它们的结构、功能也有一些小的变化。在社会问题中组织规模的扩大,子系统数目的增多,也是自生长。当然在这里,自组织理论讨论的自生长,与向气球内充气,使气球体积变大、与对振动系统输入能量,使其振幅变大不同。气球充气后体积变大等问题,其状态变量数值增加可用简单物理规律或控制方法得出。气球体积变大,可通过向气球输入的空气量、体积等物理量,利用气体定律计算出来;振动系统振幅的变大,也可通过振动方程得出。自生长是指系统演化过程中“体积”大小的增长在系统层次不能用通常的简单规律得出。当然,自生长也要依赖于一定的环境,但这是外界环境条件,不能按控制论进行分析。包括物质、能量、信息的输入一定要通过系统的自组织,通过子系统之间的相互作用,而“平均地”变成整个系统发展的动力,使之整体扩大。比如人体的自生长,是将环境的氧气、水、各种食物“吸进”人体以后,经过人的新陈代谢作用,转化为人生长所必须的成分,这些成分促进人体各部分仍按一定结构相应长大,这中间完全是系统的一个自组织过程,是一种自组织的生长壮大作用。系统的自生长可以由同样性质的子系统数目增多来实现,这可以看成是子系统的自复制,造成了系统的自生长。自生长也可以是存在于子系统层次上,每一个子系统均保持一定的结构、功能,其在演化过程中不发生变化,而只是大小发生变化,这样由子系统的自生长实现系统的自生长。一般来说,

多数情况下,子系统的自复制是系统自生长的原因。在前一章我们论述了单个子系统的自复制以后,又给出了系统整体如何自生长的实际计算图象。

6.4.5 自适应

自适应是从系统与外界的关系角度,对系统自组织过程的一种描述。它强调在一定的外界环境下,系统通过自组织过程适应环境,而出现新的结构、状态,或功能。自适应与自创生都是对整个自组织过程的分析,都是研究自组织过程前与自组织过程后系统状态的差别。但自创生是从自组织系统本身的性质来分析,从自组织过程后,系统出现了新的结构、功能的角度来分析,是对系统本身状态的描述,是对系统内部机制的探讨。而自适应是从系统对外界环境刺激的应答、对外界环境的响应角度,是从系统与环境关系的角度,来分析系统的自组织性质。因此可以说,同样一个实际例子,强调系统内部相互作用,可称为自创生;强调系统与环境关系,可称为自适应。

实际工作中,为讨论问题方便,往往把与自组织过程前系统无结构、杂乱无章状态相比,出现新的结构称为自创生,而将系统原来具有一定结构的系统,在外界环境发生变化时,结构又发生改变称为自适应。虽然从实质上来分析,上述两者区别不大,自创生产生的状态,从与环境关系来分析是自适应;自适应状态从系统出现了新的结构来看,也是自创生。但是,我们把前者称为自创生,是为了更强调自组织过程相对于自组织过程前状态来讲,是系统内部相互作用“涌现”出新的状态;而把后者称为自适应,是强调即使系统形成有序结构,只要环境发生改变,有序状态也将随之改变,体现系统有适应环境的能力。如贝纳尔流体花样出现,我们称为自创生;花样形成后,系统边界形状改变,或圆形或方形,其花样的形式也要随之改变,称为自适应。

在一定外界环境刺激下,系统必然要作出反应。一个热力学系统在均匀划一的外界环境下达到热力学平衡,这是系统对环境响应最简单的形式之一,即通过与外界平衡来实现响应,与外界温度一致、与外界压强一致、与外界浓度一致等。从分析热力学系统对外界环境响应的机制可知,其所遵从的具体理论或实现的具体途径是输运理论或输运过程。对于简单的情况,系统如何进行输运并与外界达到平衡,这在统计物理中已经进行过详细的讨论。可以说任何系统都要适应环境,不适应环境的系统必然要进行“演化”,直到与外界环境相适应为止。简单系统与外界环境适应的过程与形式也简单。一个与外界有热量交换而无做功联系的系统,在某一恒温条件下,

利用统计物理正则系综理论,可以很方便地得出系统实现与外界环境平衡的热力学状态。而在其他更复杂的情况下,系统对外界环境的响应就要复杂得多。对于一个非均匀环境,系统也需要适应,但不能像通常那样运用现有的响应理论,如统计物理、控制论等来进行分析,而需要运用自组织理论进行讨论。普利高津、哈肯等人建立的远离平衡的非平衡统计理论,通过相变、方程稳定性分析等方法讨论了一般物理、化学系统的自适应问题。对于由像生物体等具有一定智能个体(称为主体)组成的系统的自适应问题,人们也建立了相应的方法进行讨论。本书第7章、第9章将详细讨论上述两类系统的自适应问题,这里不进行分析。

上述分类讨论是从不同角度和方面对自组织过程进行的描述与分析,实际的自组织过程是复杂的。很多情况下它是上述多种分析描述的一个综合。比如一株麦苗的生长过程是一个自组织过程。在它不断生长发育阶段是自生长,二氧化碳、水、养料在植物机体内,经过光合作用,“自组织”成麦苗生长发育的养分,使麦苗植株变大。麦苗生长过程是植株整体的自生长,这里既有每一个细胞(子系统)的自生长,又有细胞的自复制,细胞数量增多,使麦苗机体扩大。一旦天气变旱,土壤中的水分减少,麦苗又要适应环境,其根系更加发达,以吸收更多水分,维持自身生长需要,这是植物的自适应。同时,在这一过程中,还存在自创生,麦苗逐渐长出麦穗,出现了新的结构。因此,我们在分析实际系统自组织时,需从不同角度进行分析。

第7章 简单巨系统

前面已经讨论过,系统科学从系统局部与整体的关系出发研究系统,并按复杂程度将系统分为4类:简单系统、简单巨系统、复杂巨系统、特殊复杂巨系统(社会系统)。我们认为这中间简单巨系统是我们研究的基础和起点。普利高津、哈肯等人创立的自组织理论,给研究简单巨系统提供了很好的工具。在这一章,我们运用自组织理论来研究简单巨系统,使我们对这一类系统有个基本的认识;也通过简单巨系统来学习自组织理论,对其获得更深入的了解。

7.1 简单系统与简单巨系统

虽然简单系统不是系统科学研究的重点,但为认识的系统性,为了解各类系统之间的关系,我们仍有必要对简单系统的性质进行简要的总结。

7.1.1 简单系统

简单系统是指不需分层次或者说仅有一个层次的系统。也可以认为,用牛顿力学理论来讨论的系统即是简单系统。简单系统一般仅包含一个子系统或少数几个子系统,现在有了计算机,对于包含几百个子系统的系统,计算它们的演化行为也不困难,有时将一些由几百个子系统组成的系统也划为简单系统。后面我们将看到子系统数目的多少不是划分系统的主要标准,只是一种参考。

判断一个系统是否是简单系统的主要标准,在于此系统是否可以采用牛顿力学的办法来刻画系统的演化。牛顿力学描写系统的演化要求系统满足叠加原理,力的叠加原理、速度叠加原理、加速度叠加原理等在牛顿力学中是显而易见的,因此通常也把是否满足叠加原理作为能否应用牛顿理论的一个判据。

一个质点的系统是简单系统,这是大家公认的。一个质点组的系统也是一个简单系统。我们研究质点组主要讨论两个方面的问题。首先研究质心运动,对质点组的质心可以根据牛顿定律分析它的加速度与质点组所受合外力之间的关系。其次也可以利用微分方程组讨论每个质点所受外力

(对质点组来讲,其中有些属于内力)已知时,各个质点运动的加速度,这与对单个质点系统的讨论是一样的,至于对质点组系统内子系统(质点)与系统(质点组)之间的关系,一般不作重点讨论。我们谈论一个质点组系统的运动状态,就是指在这个系统中的各个质点的运动状态总和。在牛顿力学中,有时我们也讨论简单情况下子系统(质点)与系统(质点组)之间的关系,但只是讨论已知所有子系统(质点)的状态,利用叠加原理来求出整个系统(质点组)在一定约束条件下的状态;而相反的过程(从已知系统的状态出发,求出子系统(各个质点)的状态)一般是不易得出结果的,除非系统在静止状态时,且也满足叠加原理,我们才可按叠加原理进行分解,从已知系统整体状态,求出每个子系统(质点)的运动状态。

在微观领域中,一个原子中电子围绕原子核按电磁相互作用关系运动,在一定近似条件下也可看为一个简单系统。对于氢原子,可以严格求出电子运动的规律,虽然得到的是一个概率规律。在量子力学看来,可以得到系统的定态解,以及在不同定态之间的跃迁概率,这就是对系统演化的确定性描述。对于两电子系统——氦原子或氢分子,也可在一定近似条件下,计算出确定的结果。近一个时期,人们用电子计算机设计出不少程序,对于多电子的原子,其运动状态也可以计算出来,甚至包括一些大分子结构的计算。特别是,计算有机大分子的结构对于化学、主要是有机化学研究有很大作用。这些是简单系统的例子。

在宏观天体现象的研究中,人们也可以按简单系统的理论来分析问题。通过万有引力分析计算太阳系内各行星的运动轨道,可以得到非常准确的结果。通过分析,周期为76年的哈雷彗星运动轨道,人们可以非常准确地计算出来,并与观察结果非常一致。

以上这些例子说明对于简单系统的理论应着重在以下几个方面理解:

(1) 简单系统是一个模型,是对一类系统的总称。它可以包括从宇观天体系统一直到微观原子系统在内的一大类系统。

(2) 简单系统的特征不在于它包含子系统数目的多少,特别是现在有了电子计算机等先进的计算工具以后,大型计算对于人们不再困难,人们更看重分析方法与分析思想。当然子系统的数目的多少,对于判断一个系统是否是简单系统也是重要的,一般子系统为几百个左右,可以通过计算机实际算出每个子系统的运动状态来,即可认为是简单系统。

(3) 简单系统的子系统与系统之间满足叠加原理。子系统与系统之间

的关系明确,可以从所有子系统的运动状态进行叠加,得到系统的运动状态;也可以从系统整体的运动状态通过分解,得到各个子系统的运动状态。系统整体就是所有子系统的叠加。

(4) 简单系统不需层次概念,或者说,只进行一个层次的分析研究。所有子系统的运动状态的总和就是系统的运动状态,对系统整体的运动状态的描述就是要描述所有子系统的运动状态。我们说太阳系运动,就是认为太阳不动,把九大行星的运动状态全讲清楚;所谓原子系统的运动状态,就是说清楚当认为原子核静止时,原子中各个电子的运动状态如何即可。

真实的系统很少有完全符合简单系统的。据现在考察,在宏观中,存在万有引力作用的两个物体组成之系统、弹簧振子系统和微观中氢原子系统可以认为是简单系统,其他系统均必须在作了若干近似以后才能被看成简单系统。这里所说近似主要有两点:(1) 当非线性作用非常小,可以忽略,其相互间的作用力可以近似为线性作用力;(2) 子系统之间产生的相互作用,可以认为仅发生在两个子系统之间,即所谓二体问题,其他子系统的存在与此二体之间相互作用无关,可以忽略。在此情况下,我们可以把系统看成一个简单系统,其他则不成。

对于一个简单系统可以得到对系统状态描述完全确定性的结果。在一定的作用力之下系统保持稳定的运动,时间在这里仅是一个描述系统状态的参量,它没有方向,是完全对称的。给定系统一个初始状态,我们可以很准确地预测系统的未来,也可以很准确地说清楚它的过去。不同的初始状态表示了过去不同的历史,也预测了不同的未来。从在一定作用力之下系统状态是完全确定的角度来看,可以认为系统不存在演化,是完全“静止的”。

完全由简单系统组成的“客观世界”是一个非常简单的世界,在这里没有任何随机性,没有变化,有的只是周而复始的运动,这也就是牛顿体系的世界。可以说牛顿体系的运动客体是简单系统,简单系统的运动框架是牛顿体系。在这个体系中“世界”是不变的,由此也必然给出一幅“静止的”图景。牛顿力学体系使人们必然会从哲学上得到“上帝第一推动力”的思考,认为只要在一开始“上帝”推动一下宇宙,则整个宇宙就会不停地、无变化地运动下去,既没有开始也没有结束,而且永远不会发生改变。

现实的宇宙不是如此,整个宇宙是演化的,每一个系统都有它存在的历史,有出生、成长、壮大,然后衰落,直至死亡。因此客观世界也就不能是由

简单系统组成。简单系统只是人们在认识自然、认识客观世界初始时期,得到的最简单的一种近似。

7.1.2 简单巨系统

简单巨系统比简单系统复杂,人们研究也比较深入的一类系统。简单巨系统仍然是一种理论模型。

简单巨系统内子系统的数目一般很多,通常多到无法一个一个地描写每一个子系统的运动。如我们讨论的热力学系统,在1摩尔体积中包含有 6.02×10^{23} 个分子,对此类热力学系统我们无法讨论一个分子的运动情况,而是要从系统的整体进行描写。

简单巨系统内子系统之间的相互作用一般不太复杂,在多数情况下,相互作用是已知的,是确定的,人们可以用确定的规律来描写各子系统之间作用。然而子系统之间的具体作用形式通常是非线性的,这将给我们讨论系统演化问题带来新的困难,主要在于对存在非线性相互作用的系统,其子系统数目多于两个以后,通常无法对这类系统中的每一个子系统演化行为作出准确的描述,系统的整体性质不能从子系统叠加得出,而会出现新的性质,对此我们称之为“涌现”出新的性质。这是简单巨系统与简单系统之间的根本差别。即使讨论一个孤立的太阳系,实际上也不是一个简单系统,地球、金星、木星等之间均存在万有引力(非线性作用)。我们无法按牛顿定律精确计算出各个行星的运行轨道。只是太阳质量非常大,在与太阳引力相比,行星之间的万有引力忽略不计以后,太阳系才能近似作为一个简单系统处理。

由于简单巨系统整体要涌现出新的性质,在这类系统中也出现了层次概念。简单巨系统至少可以分成两个层次,即系统层次和子系统层次。两个层次之间一般不存在叠加原理。不同层次上对系统演化的描述是不同的,如热力学系统,在系统层次通常采用温度、压强、体积等物理量,而在子系统层次则要用分子的动能、速度等物理量。两类物理量分别只描写各自层次上系统的性质。对于热力学系统中的分子无法谈论温度、压强;反之,对于系统整体也无法说动能、速度等。

简单巨系统也不再适用叠加原理,简单巨系统两个层次之间物理量不能通过叠加原理得出,通常是在各层次上独立进行分析,得到结果;在分析两个层次之间关系时,应根据具体系统的特点,逐一进行分析。当然由于现在叠加原理仍然是探索自然绝大多数理论的基础,因此目前在大多数简单

巨系统的理论中需要定量计算时,还经常采用叠加原理。需要指出,在简单巨系统中运用叠加原理与在简单系统中运用叠加原理有两个区别:(1)简单巨系统的子系统数目特别多,在进行叠加时,经常要取 $N \rightarrow \infty$ 的热力学极限,数学计算中运用满足大数定律的一些公式;(2)对于一个简单巨系统利用叠加原理得到的结果,只适用于这一个系统,并不能随意地用到一般简单巨系统中去,其适用条件必须加以说明。

简单巨系统出现了层次,这就使得我们在状态描述及分析计算上与简单系统有了很大的区别。这里从一个简单的例子进行说明,一个由 N 个质点组成的质点组是一个简单系统。我们可以依据牛顿定律列出每个质点的动力学方程

$$F_i + \sum_{j \neq i} F_{ij} = m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} \quad (7.1.1)$$

其中 F_{ij} 为第 j 个质点对第 i 个质点的作用力, F_i 为质点组外对质点 i 的外力和。只要这些力是已知的,就可以求出每个质点的状态随时间的变化。实际问题中各质点之间的作用力是一对作用力和反作用力, $F_{ij} = F_{ji}$, 各质点的位移 x_i 相互之间也有一定的关系,因此对质点组力学问题可以得到较好的结果。牛顿力学的任务就是求出各质点运动状态随时间的变化情况。

牛顿力学对质点组还讨论了质心运动定律,并可以给出

$$\sum_i F_i = M \frac{d^2 x_c}{dt^2} \quad (7.1.2)$$

从质点组所受合力求出质心位移随时间的变化规律。特别需要指出的是,在简单系统中,质心运动定律是作为质点组各个质点运动规律的一个推论。在牛顿力学中(7.1.2)关于质心运动规律的表达式可以从表示质点组内各个质点运动的表达式(7.1.1)推导出来。这就表明质心定律在简单系统的理论中仅是使对系统运动状态、运动定律描写更简单、更方便,而没有更深刻的内容。

前面已经论述,简单系统、简单巨系统都是一种模型。当然,也可以将质点组看成简单巨系统,这一系统分成两个层次。在系统层次(质点组层次),描写系统状态变量为质心的位置、速度等,分析系统所受外力与质心位置、速度关系,可以建立质心运动定律。在子系统层次(质点层次),描写系统的状态变量为各个质点的位置、速度等,分析各个质点所受外力(有些在质点组层次来看属于内力)与质点的位置、速度之间关系,建立质点运动定

律。这是两个不同层次上的定律,应该认为它们是相互独立的。只是对于机械运动这类具体运动形式,在一定条件下,可以建立两个层次之间的联系而已。

对于一般简单巨系统我们应该建立类似于质心运动定律(如在机械运动中)的系统演化方程,分析研究系统的运动规律。也同样应该建立类似于质点运动定律的子系统演化方程,分析研究子系统的运动规律。如果能找到宏观层次(系统层次)与微观层次(子系统层次)之间关系,则可进一步分析系统性质;如果找不到相互之间的关系,只分别给出两个层次上系统的变化特点与规律,对于简单巨系统也是很正常的事情。而且在多数情况下,由于子系统数目很多,因此我们往往仅在系统的层次上讨论系统的行为,无法在了系统层次讨论系统的行为,进而也就无法分析两个层次之间运动状态的联系了。

7.2 熵——简单巨系统的基本概念

简单巨系统是一类涉及包括力学、物理学、化学、地质学以及社会科学等多个领域的系统,在这些领域中系统之间的具体形态与功能有着非常大的差别。如何描述简单巨系统的状态呢?我们认为简单巨系统的特点在于子系统数目多,相互之间关系简单。在这种情况下,选择在对系统总体性质做贡献上各个子系统的作用大小是一个很好的物理量,这就是熵。为加深对熵概念发展历史的了解和对熵物理量性质的认识,我们总结有关方面的知识,并在此基础上,提出简单巨系统熵的定义,分析它的性质。

7.2.1 玻尔兹曼熵

作为一个物理概念,熵最早是在热力学中由克劳修斯引入的。在热力学中熵是作为热力学系统演化过程中不可逆性的一个量度:在孤立的热力学系统,自发演化过程中熵不可能减少,系统最终达到一个熵最大的状态。在演化过程中,两个状态之间的熵变化的具体数值,由联系两个状态之间可逆等温过程中系统吸收的热量被温度除后的商值表示

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (7.2.1)$$

这里的分析对于理解简单巨系统的熵概念并无直接意义,而只是帮助我们认识熵概念的起源和最初定义下的性质。从中我们可以看出熵一开始就是作为一个描述系统状态的量,但这里仅仅给定系统状态之间的差值,对每一

个状态仅确定到一个待定的常数 S_0 。

玻尔兹曼(L. Boltzmann)在统计物理学中讨论由大量微观粒子组成的系统,他通过平衡态时系统的热力学关系(热力学第一定律),在给定了熵的零点值以后,得到了一个热力学系统某一状态的熵值 S ,其具体数值可写为

$$S = k_B \ln W \quad (7.2.2)$$

其中, k_B 为玻尔兹曼常量, W 为该宏观状态下对应的系统的微观状态数。(7.2.2)是(7.2.1)在一定限制条件下的具体结果。当然,也可以把(7.2.2)作为熵的定义。这时,它描写平衡状态下系统的某种性质,这种性质反映系统某一宏观状态所包含的微观状态数的多少。热力学系统的一种微观状态,就是分子的一种分布排列。对于系统某一宏观状态来讲,其包含的微观状态数多,系统该状态的熵值高,表明其混乱程度大;否则,包含的微观状态数少,系统该状态熵值低,混乱程度小。若某宏观状态仅包含一种微观状态,熵值为零,则系统状态完全不混乱。对于玻尔兹曼定义的统计物理熵,在系统满足统计物理假设(等概率假设)并给定熵的零点 $S_0 = -k_B \ln N$ 以后,可以证明,它与热力学熵是等价的。

从上面的定义可以看出对于每一个状态可以求出一个熵值,不同状态有不同熵值。系统熵值大小与演化过程无关,熵是系统的态函数。热力学熵表达式中虽然与可逆等温过程紧密联系,但它只表明可以通过这一具体过程计算出热力学熵,并不表示熵与过程有关。还可以看出统计物理熵仅适用于平衡态,因为只有在平衡态各种物理量,如温度(T)、压强(p)等才有意义,否则无法进行定义。为了描述更多类型的系统状态,玻尔兹曼将熵概念又推广到非平衡态。一个处在非平衡状态的系统,熵等于其各个局部分别处在各自平衡态上的熵之和,即

$$S = \sum_i S_i \quad (7.2.3)$$

这里有两个要求:(1) 要求系统各个局部处在平衡态,即系统要满足局域平衡假定,这在第6章已进行过详细讨论,这里只是再强调说明,局域平衡假定是一个要求并不太强的假定。大多数系统,只要不是处在高真空条件或不进行如爆炸之类的剧烈反应,它们都满足局域平衡假定。(2) 要求系统满足叠加原理,这里不要求每个子系统满足叠加原理,而是要求每个局部在构成系统整体时满足叠加原理。例如对于一个 1 分米^3 的系统,对以 1 毫米^3 为单位的各个局部,在叠加为整个系统时,要求其满足叠加原理即

可(这里进行叠加时,相当对 10^6 个子系统取和,它比对子系统(分子)进行 10^{23} 取和要求均满足叠加原理要松得多)。

7.2.2 概率测度熵

要建立简单巨系统的熵概念仅了解统计物理熵还是不够的,还必须了解信息熵。

信息熵是香农在讨论通信问题时引入的,第10章将对信息、信息熵进行讨论。那里将信息概念进行了推广,使之能在一般系统的范围进行使用;而信息量的计算,即信息熵却仍局限在通信领域内。这里我们要指出,人们进一步将信息熵进行推广,建立在概率论的基础上,最终规范形成完整的数学定义,这可称之为概率测度熵。

【概率测度熵定义】假定一样本空间 X 有 n 个事件 X_i , 每个事件出现概率(具有的概率测度)为 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$, 存在基本关系 $\sum_{i=1}^n P_i = 1, P_i \geq 0$ 。若有一函数 $H(P_1, \dots, P_n)$ 要求它满足下述条件:

- (1) 对于固定的 n 来说 H 是 $P_1, \dots, P_n$ 的连续函数;
- (2) 若 $P_i = \frac{1}{n}, i=1, \dots, n$, 则对应的 $H\left(\frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right)$ 应是 n 的单调递增函数;
- (3) 若将一试验分解成多个相继的试验, 则原先的 H 值应为分解后多个试验相应各个 H 值的加权和;

则将此函数 $H(P_1, \dots, P_n)$ 定义为熵。¹

可以证明存在如下表达式

$$H = S = -k \sum_i P_i \log P_i \quad (7.2.4)$$

其中 k 为比例系数,它取决于各物理量的单位选取,若 S 取比特为单位,对数以10为底,则 $k=1$; i 取和遍及整个系统。概率测度熵是反映上述测度空间整体的不确定性。一个系统内每一个元素的概率测度,即不确定性用 P_i 来表示,而整个系统整体的不确定程度用(7.2.4)表示出来。所以用这样的表达式定量表示,是为了使此不确定性定义满足我们对不确定性的定性认识,也只有这样才有可能满足我们对两个系统之和的不确定性程度应等于各自满足不确定程度之和的愿望。

此表达式虽然与信息熵表达式一样,但信息熵仅适用于通信系统。而这里,第一它适用于一般系统,而且有了更明确的物理意义,即描述了系统

整体的不确定性;第二概率测度熵的表达式(7.2.4)是从定义推出的结果,更基本的含义应是反映整体不确定性要求的三个条件。

对于一个具有 n 个子系统的集合,其各个子系统的测度全同 $P_i(x_i) = 1/n$ 时,则利用(7.2.4),可有

$$S_{\text{测}} = -k \ln n \quad (7.2.5)$$

当 k 取 $k_B/\log_{10}e$ 时,(7.2.5)与(7.2.2)一样。亦即,可以认为玻尔兹曼熵是概率测度熵在各子系统出现概率一样的特殊情况。实际上我们知道统计物理建立的基础就是等概率遍历假说,因此得到这里的结果是丝毫不奇怪的。

有了概率测度熵概念,对非平衡态的统计物理熵也可以不从局域平衡假设出发,再利用熵的广延性,由叠加原理得出。我们可以将非平衡系统看成一个在外场作用下的平衡态系统,对于这一“平衡系统”,其各个微观状态出现概率不相等,利用概率测度熵公式就可求出非平衡态的玻尔兹曼熵。

概率测度熵的核心思想,是描写集合(在系统科学中称为“系统”)整体的不确定程度。在此概念基础上,人们对于可测变换定义了科尔莫戈罗夫熵,描写可测变换的不确定程度;对于拓扑变换定义了拓扑熵,描写拓扑变换的不确定程度。

一个包含有 N 个子系统的系统,从子系统层次来看,当每个子系统存在概率测度,它可以看成是子系统的不确定性,那么在系统整体层次也必然存在不确定性,这个不确定性是由子系统的不确定性造成的。如何衡量系统的整体不确定性?首先,它们之间要满足叠加原理,这就是我们在定义中第三条所要求的。如果一个系统不满足叠加原理,我们则从基础上就无法给出整体不确定性的熵概念。其次,前述定义给出了一个自洽的表达式,即满足上述三个条件可推出熵一定会写成表达式(7.2.4);如果存在(7.2.4),则它必然满足三个条件。这三个条件是我们讨论系统整体不确定性问题上需要其具有的。根据这里的讨论,简单巨系统中的一部分具有可加性的系统,或对于系统中具有可加性的物理量,可以建立熵概念。而对于开放的复杂巨系统,由于其不满足叠加原理,故无法建立熵概念。

7.2.3 简单巨系统熵定义

在概率测度熵概念的启发下,我们对于一个简单巨系统,描写它整体与局部之间的关系,描述系统整体确定以后,其局部的变化情况,可以给出熵的概念。²

【定义】对于一个由 N 个子系统组成的简单巨系统,考察系统具有可加

性的某性质 $\mathcal{X}$, 其测得总量为 X , 每个子系统的测量值为 X_i , 它对总量的贡献为 $P_i = \frac{X_i}{X}$, 则系统关于性质 $\mathcal{X}$ 的熵值为

$$S = H_{\mathcal{X}} = -k \sum_i P_i \log P_i \quad (7.2.6)$$

首先, 对于上述定义, 有一定的适用范围。在上一节简单巨系统的定义中, 我们并未要求简单巨系统内子系统与系统之间满足叠加原理, 一般讲系统可能“涌现”出子系统没有的一些新的性质, 对于涌现出的新性质, 子系统不存在该性质, 无法讨论从子系统的性质如何得到系统的新性质, 也就无法从熵的角度来衡量这些新性质; 熵只能衡量那些满足叠加原理的简单巨系统, 或者更准确地讲, 熵只能衡量那些具有可加性性质的整体与局部之间的关系。

其次, 对于一个简单巨系统可以定义多个熵。针对系统每一个具有可加性的性质, 我们都可以定义一个熵, 来反映整体的不确定性, 或反映整体与局部的关系。前面所讨论的信息熵, 可被认为是针对简单巨系统(通信系统)信息量这一性质, 讨论构成总信息量时, 各个子系统(字符)所提供贡献的分布情况; 玻尔兹曼熵是讨论热力学系统(也可看成简单巨系统), 对系统确定宏观状态, 分子(子系统)排列状况关系的讨论。对于一般简单巨系统, 可以存在多种性质, 对于每一种性质, 我们都能讨论它对应的熵值, 讨论对于此种性质, 系统整体与局部之间的关系。

【例 7.2.1】 一个由 A、B、C 三个子系统(工厂)组成的简单巨系统(行业), 总生产量为 300 单位不变时, 若此产量由三个子系统平均提供, 每个工厂生产 100 单位, 此时系统的熵值为:

$$H_1 = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{3} \log \frac{1}{3} = \log 3 \quad (7.2.7)$$

若此产量由 A 完成 150 单位, B 完成 100 单位, C 完成 50 单位, 则此时系统的熵值为

$$\begin{aligned} H_2 &= - \left[\frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \log \frac{1}{3} + \frac{1}{6} \log \frac{1}{6} \right] \\ &= \frac{2}{3} \log 2 + \frac{1}{2} \log 3 < H_1 \end{aligned} \quad (7.2.8)$$

从此例中看出, 我们可以通过熵值大小来定量表示系统的产量是由各个子系统(工厂)平均生产提供(熵值大), 还是由某个子系统(工厂)主要生产提供(熵值小)。³

7.2.4 简单巨系统熵对系统的描述

由于简单巨系统熵是从玻尔兹曼熵、信息熵、概率测度熵概念上发展起来的一个基本概念,因此它与上述熵一样,也可以描述系统的状态,是态函数。一个状态对应一个函数值,而不管这个状态是从哪里演化来的。其次,它的熵函数零点也已经被指定,即当系统该性质数值仅由其中一个确定的子系统提供,其余子系统对该性质的贡献为零时,系统对该性质的熵定为零。这与信息熵、玻尔兹曼熵、概率测度熵的定义也都是一样的。

系统科学更重视研究系统的演化情况。简单巨系统的熵也同样可以描写系统以该物理量为标志的演化方向。

系统科学认为系统总要与外界之间进行物质、能量、信息的交流,因此不着重讨论孤立系统的演化。在简单巨系统与外界交流进行演化时,其熵值增加,表示系统向着各子系统对系统该性质均匀进行贡献的方向发展;熵值减少,系统向着某一单个个体对系统该性质主要进行贡献的方向演化。以一个由 N 个厂家组成的生产系统为例,当某一项先进技术仅在一个工厂(子系统)内实行时,由于该子系统产量增加,使各子系统之间对系统总量贡献的比例发生变化,整个系统的熵值要减少;在该项技术推广期间,各子系统由于推广,普遍使用该项技术,而各厂产量趋于均匀,系统的熵就要增大。可以用熵增加或减少来表示系统演化是朝着各子系统均衡,还是各子系统差别加大方向发展。我们用此概念讨论了世界上一些国家交通事业上各类能源消耗的比例,以及不同交通工具对能源消耗情况的分析,得出了有益的结果。

7.3 数学模型

客观世界的对象多种多样,系统科学与其他科学一样,它的一种理论也仅适用于一类系统,若将这一类系统的特点归纳提炼出来,就形成一个模型。从这个意义上来说,每一种理论都是针对一定的模型的。简单巨系统是我们对一类系统的概括,它也是一种模型,简单巨系统理论是对简单巨系统模型适用的理论,前面我们已对这类系统的各种性质进行过分析。一个系统必须满足简单巨系统的性质,才能被称为简单巨系统,也才能用简单巨系统的理论进行研究。因此建立模型是我们选择所采用理论和数学分析方法的前提,是我们能否解决问题的关键。而在具体研究简单巨系统时,又要根据系统的不同特点,根据选择的方法来建立不同的模型。每一类数学模

型,对应一类数学方法,可解决一类问题。下面我们按照建立模型方法的不同,来分别介绍几类简单巨系统的模型。

7.3.1 唯象方法:宏观唯象演化模型

这是对简单巨系统最常用的一种建模方法。它根据系统的宏观性质,不考虑系统的内部机制,直接利用系统宏观层次上功能的特点建立演化方程。在这种系统模型中,不仅无法了解系统的微观机制,无法了解系统微观与宏观之间的关系,而且对系统在宏观上结构的特点也很难分析。但是这种模型形式简单,较容易分析系统的功能。也正是如此,对于不同结构的系统,只要它们的功能一样,就可建立起一样的模型。以前利用唯象方法分析简单巨系统多是集中在非平衡统计物理和非平衡热力学领域中,一般主要讨论和分析化学反应系统,通常人们也把唯象模型称为反应扩散方程模型。建立模型的具体方法是,利用化学反应式将系统的功能表示出来,再根据化学反应式写出系统演化的唯象模型。

7.3.1.1 捕食者-被捕食者系统

我们以捕食者-被捕食者演化系统来分析如何建立一个系统的反应扩散方程。一个捕食者-被捕食者系统的功能特点可如下表示:



上式中 X 表示一个子系统(被捕食者子系统), Y 表示另一个子系统(捕食者子系统);被捕食者 X 的增加依赖于外界食物的供给,由第一式表示;第二式表示捕食过程,被捕食者减少,捕食者增加,而它们增加减少的程度与其数量成正比;被捕食者的数量减少由第三式表示。这样的表达式也可表示一个化学反应, X 、 Y 分别表示反应中两种中间产物,每一个式子表示一步反应。

根据反应式(7.3.1)我们可以建立系统随时间演化的数学模型。针对上述反应式子,我们可知组分 A 、 D 由外界条件控制,维持其浓度的变化,组分 X 、 Y 浓度的变化完全依靠系统内的动力学过程。上述三个反应可分别有三个反应速率系数 k_1 、 k_2 、 k_3 , 一般为常数。列出上述三个反应中组分 X 、 Y 的变化形式,第一反应中, X 随反应发生不断增加,增加速度的大小取决于组分 A 的多少及反应进行快慢的系数 k_1 。 X 的变化率可以写为:

$$\frac{dX}{dt} = k_1 AX \quad (7.3.2)$$

第二反应表示捕食过程, X 变化率为负, X 下降的快慢决定于反应速率系数 k_2 、 Y 和 X 的多少。演化方程式写为:

$$\frac{dX}{dt} = -k_2 XY \quad (7.3.3)$$

此反应中 X 减少的同时, Y 数量增加, 增加机制与 X 减少机制一样, 同理, Y 的演化方程为:

$$\frac{dY}{dt} = k_2 XY \quad (7.3.4)$$

第三反应为变量 Y 减少的过程, 减少快慢决定于反应速率系数 k_3 和组分 B 的多少。写出方程为:

$$\frac{dY}{dt} = -k_3 BY \quad (7.3.5)$$

总括两个变量、三步反应, 写出系统总的演化方程为:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = k_1 AX - k_2 XY \\ \frac{dY}{dt} = k_2 XY - k_3 BY \end{cases} \quad (7.3.6)$$

经过适当变换, 取 $a = \frac{k_1 A}{k_2}$, $b = \frac{k_3 B}{k_2}$, $\tau = k_2 t$, 得到标准的洛特卡-沃尔泰拉方程:

$$\begin{cases} \frac{dX}{d\tau} = aX - XY \\ \frac{dY}{d\tau} = XY - bY \end{cases} \quad (7.3.7)$$

其中 a 、 b 为可调参数, 仅与反应物 A 、 B 及反应速率系数有关。

从建立洛特卡-沃尔泰拉模型的过程可以总结出, 在以化学反应形式表现系统内各量相互作用方式时, 构造其演化方程的一般方法在于: 确定演化方程中变量 X 、 Y 的变化率要依次考察每一步化学反应, 化学反应前后某物质数量有变化, 该反应才对该物质演化方程右端有影响, 需要列出一项, 否则无影响; 若该步反应使 X (或 Y) 物质数量增多, 则方程右端对应项为正, 否则为负; X (或 Y) 演化方程右端该项的具体形式由对应参加反应的物质及反应速率常数决定, 多种物质参加反应时, 其对该项的贡献为各种物质浓度的乘积, 若某种物质如 X 物质参加反应时为两个分子, 则其贡献为 X^2 因

子。按此建模原则,只要能从实际系统演化过程中得到类似化学反应的表达式(如 7.3.1),就可以很方便地写出系统演化的数学方程。

7.3.1.2 阿尼斯定理

为了加深对此种建模方法的理解,下面我们讨论阿尼斯(Hanusse)定理。此定理告诉我们,一个化学反应系统要出现有序的时间振荡结构,其中必然要有一步是三分子反应。在普利高津《非平衡系统的自组织》一书中介绍的布鲁塞尔模型(Bruselator)所以重要,就在于它既包含有各种丰富的有序结构,又是一种比较简单的反应系统,系统特性的关键在于有一步是三分子反应⁴。

【阿尼斯定理】在包含两种中间产物的反应序列中,如果各个反应阶段只是单分子或双分子反应,则不可能有包围不稳定结点或焦点的极限环。⁵

证明:这里仅分析空间均匀无扩散项情况。关于空间不均匀、存在扩散项时的证明也已由泰森(J. Tyson)和莱特(J. Light)给出⁶。两种中间产物的数量分别用 X 、 Y 表示,它们不含扩散项的反应扩散方程(即系统的演化方程)为:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = f_1(X, Y) \\ \frac{dY}{dt} = f_2(X, Y) \end{cases} \quad (7.3.8)$$

由于在此二中间产物所经历的反应序列中,各步反应最多仅有两个分子参加,按照我们通过化学反应来建立系统演化方程的法则,上方程组中右端的函数 f_1 、 f_2 关于 X 、 Y 的最高幂次不能超过 2 次,即

$$\begin{aligned} f_1 &= a_0 + \alpha X + bY + cXY + dX^2 + eY^2 \\ f_2 &= \alpha_0 + \alpha X + \beta Y + \gamma XY + \delta X^2 + \epsilon Y^2 \end{aligned} \quad (7.3.9)$$

下面分析上式中各项系数的符号。常数项只能反映所对应的该种产物的产生,故 $a_0 > 0$, $\alpha_0 > 0$ 。 f_1 方程中系数 b 、 e 对应项中无 X ,表明该反应前无 X 物质参加,而该项出现在 f_1 方程内,反应必然与 X 物质有关,则只能是在反应过程中生成 X 物质,故系数 b 、 e 必为正;同样可类似分析方程 f_2 中的系数 α 、 δ 也必为正。 f_1 方程中 dX^2 项表明反应前有两个 X 物质分子参加反应,根据反应过程仅有单分子或双分子参加,故反应后不可能出现三个 X 物质分子,最多只能出现一个 X 分子,因此系数 d 必为负;类似分析第二个方程中系数 ϵ 也必为负。其余系数符号不确定。

方程组(7.3.8)的定态解为代数方程 $\begin{cases} f_1(X_0, Y_0) = 0 \\ f_2(X_0, Y_0) = 0 \end{cases}$ 的解 $\begin{Bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{Bmatrix}$ 。具体应有关系式:

$$X_0(a + cY_0 + dX_0) = -(a_0 + bY_0 + eY_0^2) \quad (7.3.10)$$

$$Y_0(\beta + \gamma X_0 + \epsilon Y_0) = -(\alpha_0 + \alpha X_0 + \delta X_0^2) \quad (7.3.11)$$

对此定态解进行线性稳定性分析,取 $\begin{cases} X = X_0 + u \\ Y = Y_0 + v \end{cases}$,代入(7.3.8),并只保留线性项有:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = a_{11}u + a_{12}v \\ \frac{dv}{dt} = a_{21}u + a_{22}v \end{cases} \quad (7.3.12)$$

其中, $a_{11} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial X} \right|_{\substack{X=X_0 \\ Y=Y_0}} = a + cY_0 + 2dX_0$

$$a_{12} = \left. \frac{\partial f_1}{\partial Y} \right|_{\substack{X=X_0 \\ Y=Y_0}} = b + cX_0 + 2eY_0 \quad (7.3.13)$$

$$a_{21} = \left. \frac{\partial f_2}{\partial X} \right|_{\substack{X=X_0 \\ Y=Y_0}} = \alpha + \gamma Y_0 + 2\delta X_0$$

$$a_{22} = \left. \frac{\partial f_2}{\partial Y} \right|_{\substack{X=X_0 \\ Y=Y_0}} = \beta + \gamma X_0 + 2\epsilon Y_0$$

微分方程组(7.3.12)对应的特征方程为:

$$\lambda^2 - T\lambda + \Delta = 0$$

$$\text{其中, } T = a_{11} + a_{22} = a + cY_0 + 2dX_0 + \beta + \gamma X_0 + 2\epsilon Y_0 \quad (7.3.14)$$

$$\Delta = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \quad (7.3.15)$$

特征根为 $\lambda = \frac{1}{2} [T \pm \sqrt{T^2 - 4\Delta}]$, 利用(7.3.10)、(7.3.11)可将(7.3.14)写为:

$$T = -\frac{1}{X_0}(a_0 + bY_0 + eY_0^2) + dX_0 - \frac{1}{Y_0}(\alpha_0 + \alpha X_0 + \delta X_0^2) + \epsilon Y_0 \quad (7.3.16)$$

由于化学反应定态解 $\begin{Bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{Bmatrix}$ 非负,又由前面对系数符号的分析,可知 $T \leq 0$,

由此可断定只有在 $\Delta < 0$ 时,特征根 λ_1, λ_2 才为一正一负,即定态解 $\begin{Bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{Bmatrix}$ 为鞍点。其余情况下定态解均是稳定的,不可能出现定态解失稳形成极限环的情况;而 $\Delta < 0$ 时,定态解是鞍点也不会形成极限环。

7.3.2 微观方法:分析微观作用建立模型

我们以激光为例讨论微观方法的特点。简单巨系统的演化方程通常是在系统层次描写整体的性质的变化,所谓微观方法是从子系统之间的相互作用出发,建立演化方程,并在其过程中加入适当约束条件,得到系统整体的性质。⁷

7.3.2.1 建立微观方程

激光系统是光场与原子之间的作用。在微观层次,光场可用电场强度 $E(\vec{X}, t)$ 表示,将其写成不同频率的行波的叠加:

$$E(\vec{X}, t) = \sum_{\lambda} \sqrt{\frac{2\pi\hbar\omega_{\lambda}}{V}} [b_{\lambda} e^{i\vec{k}_{\lambda}\vec{X}} - b_{\lambda}^* e^{i\vec{k}_{\lambda}\vec{X}}] \quad (7.3.17)$$

其中 V 是系统的体积, $\sqrt{\frac{2\pi\hbar\omega_{\lambda}}{V}}$ 为归一化因子, $\vec{k}_{\lambda}$ 为 λ 波对应的波矢量, $b_{\lambda} = b_{\lambda}(t)$ 为 λ 波的复振幅,光场行为可由振幅 b_{λ} 表示。研究激光问题仅注意某一频率的光波,下面选择 b_{λ} 为变量。原子的行为分别由单个原子状态(用原子偶极矩 α_{μ})和能级上的原子数(两能级之间的粒子数反转 $\sigma_{\mu} = (N_2 - N_1)_{\mu}$)表示。根据光场与原子之间的作用,列出上述三个变量随时间的演化方程。

光波振幅 b_{λ} 满足振动方程:

$$\dot{b} + kb + i[\omega b + \sum_{\mu} g_{\mu} \alpha_{\mu}] = F(t) \quad (7.3.18)$$

其中为简单省略了下脚标 λ , k 为阻尼系数, ω 为固有频率, g_{μ} 为原子偶极矩与光场之间的作用系数, $F(t)$ 为作用在光波 b 上的随机力。

原子偶极矩 α_{μ} 也满足类似的振动方程:

$$\dot{\alpha}_{\mu} + \gamma\alpha_{\mu} + i[\nu\alpha_{\mu} - \sum_{\lambda} g_{\mu\lambda}^* b_{\lambda}\sigma_{\mu}] = \Gamma_{\mu}(t) \quad (7.3.19)$$

其中 γ 为阻尼系数, ν 为固有频率, $\Gamma_{\mu}(t)$ 为作用在原子偶极矩 α_{μ} 的随机力。

粒子数反转 σ_{μ} 的演化受到随机力 $\Gamma_{\sigma\mu}(t)$ 、与平衡态时粒子数 d_0 的偏离多少、光场与偶极矩互作用三者的影响,写出演化方程为:

$$\dot{\sigma}_\mu = \gamma_{11}(d_0 - \sigma_\mu) + 2i \sum_\lambda (g_{\mu\lambda} \alpha_\mu b_\lambda^\dagger - c.c.) + \Gamma_{\sigma\mu}(t) \quad (7.3.20)$$

为方程形式简单, 定义 $\tilde{k} = k + i\omega$, $\tilde{\gamma} = \gamma + i\nu$, 且以下书写去“ $\sim$ ”号, 则 (7.3.18)、(7.3.20) 成为典型的非线性演化方程。

$$\dot{b} = -kb - [\sum_\mu i g_\mu \alpha_\mu] + F(t) \quad (7.3.21)$$

$$\dot{\alpha}_\mu = -\gamma \alpha_\mu + [i \sum_\lambda g_{\mu\lambda}^* b_\lambda \sigma_\mu] + \Gamma_\mu(t) \quad (7.3.22)$$

7.3.2.2 从微观方程推导系统的宏观模型

先假定 b 、 σ_μ 与时间的关系是已知的, 对于激光, 可仅考虑单一频率, 从 (7.3.22) 可直接求解, 积分得出

$$\alpha_\mu(t) = i g_\mu^* \int_{-\infty}^t e^{\gamma(\tau-t)} (b \sigma_\mu)_\tau d\tau + \hat{\Gamma}_\mu(t) \quad (7.3.23)$$

其中 $\hat{\Gamma}_\mu(t) = \int_{-\infty}^t e^{-\gamma(t-\tau)} \Gamma_\mu(\tau) d\tau$ 。

假定原子偶极矩 α_μ 的弛豫时间远小于光场 b 及反转数 σ_μ 的固有弛豫时间 (这在通常情况下是满足的), 我们在 (7.3.23) 中可将 $b \sigma_\mu$ 作为常数提至积分号外, 有

$$\alpha_\mu(t) = \frac{i}{\gamma} g_\mu^* b \sigma_\mu + \hat{\Gamma}_\mu(t) \quad (7.3.24)$$

将 (7.3.24) 代入 (7.3.20), 有

$$\dot{\sigma}_\mu = \gamma_{11}(d_0 - \sigma_\mu) - \frac{2}{\gamma} g_\mu^2 b^\dagger b \sigma_\mu + c.c. + \Gamma_{\sigma\mu}(t) + H_\mu(t) \quad (7.3.25)$$

其中 $H_\mu(t) = 2i g_\mu b^\dagger \hat{\Gamma}_\mu(t)$ 。

进一步比较可知, 反转数 σ_μ 的弛豫时间要小于光场 b 的弛豫时间, 可以仅讨论 σ_μ 定态解条件下系统的性质, 取 $\dot{\sigma}_\mu = 0$, 且在光场较弱时, 对小量 $bb^\dagger$ 展开后, (7.3.25) 成为

$$\sigma_\mu = d_0 \left(1 - \frac{4g_\mu^2 b b^\dagger}{\gamma_{11} \gamma} \right) \quad (7.3.26)$$

为简单用 g 表示 g_μ , 将 (7.3.24)、(7.3.26) 代入 (7.3.21), 可有

$$\begin{aligned} \dot{b} &= -kb + \sum_\mu g^2 \frac{b \sigma_\mu}{\gamma} + \hat{F}(t) \\ &= -kb + \frac{g^2}{\gamma} b D_0 - \frac{4g^4}{\gamma_{11} \gamma^2} b b^\dagger b N d_c + \hat{F}(t) \end{aligned} \quad (7.3.27)$$

其中, $\hat{F}(t) = F(t) - \hat{\Gamma}_\mu(t)$, 第二项中平均值 d_0 由实际值 d_c 代替。利用

$Nd_c = \frac{k\gamma}{g^2}$, 进一步可得:

$$\dot{b} = -\alpha b - \beta b^3 + \hat{F}(t) \quad (7.3.28)$$

其中, $\alpha = k - \frac{g^2}{\gamma} D_0$, $\beta = \frac{4g^2 k}{\gamma_{11}\gamma}$, 这是激光微观演化方程。讨论宏观性质, 对光场取平均值, 方程(7.3.28)是一个规范的尖拐突变方程, 是否发生相变, 决定于 α 取值的正负。

当系统反转数小, 满足 $D_0 < \frac{k\gamma}{g^2}$ 时, 方程(7.3.28)只有一个定态解 ($b=0$), 各个原子随机发射光子, 形成自然光;

当系统反转数大到一定程度, 满足 $D_0 > \frac{k\gamma}{g^2}$ 时, 方程有三个定态解, $b=0$ 定态解不稳定, 两个 $b \neq 0$ 定态解稳定, 系统可以存在非常强的、稳定的、某一频率的光波, 即激光。

在建立激光系统演化方程(7.3.28)中, 我们有如下体会, 它也是微观方法建立系统演化模型过程需考虑的步骤。

- (1) 首先进行微观相互作用分析, 这里对微观原子与光场的相互作用进行分析;
- (2) 从微观分析得出的关系, 进行加总取和, 得到系统整体的性质;
- (3) 在加总过程中, 根据具体情况, 进行适当近似。对于激光系统, 我们的近似为: 光场看成各种行波的叠加; 原子偶极矩的弛豫时间最小, 光场的弛豫时间最长; 弛豫时间小, 变量变化快, 根据哈肯役使原理, 可令其导数等于零。

7.3.3 统计物理方法: 统计静态模型

反应扩散方程系统的唯象模型仅能反映系统在宏观上的性质, 但是无法分析系统整体与局部的关系, 对系统的描述也不全面, 同时宏观分析无法讨论涨落及更深入的问题; 直接从分析微观相互作用建立系统演化方程, 对一般系统很难做到, 因此我们选择统计物理方法, 建立系统微观运动和宏观性质之间的关系。

一般情况下, 一个物理、化学系统包含有大量子系统, 如单一气体的热力学系统, 1 摩尔体积气体中包含了 $M = 6.02 \times 10^{23}$ 个分子, 按每个分子有 3 个自由度计算, 完全描写该气体系统需要 $6M$ 个状态变量。按照一般力学理论, 同一运动系统, 可用不同变量描写, 但不论如何选择变量, 描写系统状

态变量的个数不会改变。宏观层次上讨论系统演化选择 n 个宏观变量(各种组分浓度、压强等),一般 $n \ll 6M$, 因此宏观层次上用 n 个量不能反映系统的全部性质。为了充分描写系统,必须考虑 $6M - n$ 个变量的作用。只有分析 $6M - n$ 个变量的作用才能讨论诸如随机涨落对相变的作用,讨论当系统存在多重定态时,系统会向哪个定态上转化等问题。

对于由大量子系统组成的系统,由于 $6M \gg 0$, 我们无法用动力学的方法通过讨论众多方程来研究系统的性质。上面利用微观子系统相互作用机制建立系统演化方程,仅对少数几类系统,如激光系统适用。对大多数系统,人们利用统计物理学,采用等概率假设,计算在各种条件下系统的配分函数 Z , 建立系统宏观变量与系统内子系统微观运动之间的联系。现在,通常讨论系统处在平衡态的三种情况,并建立三种系综(ensemble),给出相应配分函数。在统计物理中,根据系统物理约束机制求出其概率密度,有了概率密度,就可以利用系统的微观性质来计算热力学量。所谓微观性质是指组成系统的粒子的重量、相互作用势以及粒子的统计性质等。概率密度的归一化因子就是系统的配分函数。在数学计算上利用配分函数来求系统的热力学性质往往更方便。因此不少书中均给出不同情况下系统的配分函数形式。

系统与外界无任何交流,孤立系统无限长时间后,处于平衡状态。对此状态,统计物理学建立微正则系综来描写系统的性质,给出概率分布:

$$\rho(q, p) = C \quad (7.3.29)$$

系统仅与一个恒温大热源(温度为 T)接触,外界对系统不做功,相互无物质交换,仅存在能量交换,时间无限长后,系统处于平衡态。对此状态,统计物理学建立正则系综来描写系统的性质,给出概率分布、配分函数

$$\rho(q, p) = \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s}, \quad Z = \sum_i e^{-\beta E_i} \quad (7.3.30)$$

系统与一个恒温、恒密度粒子源(温度为 T , 密度为 N) 接触,外界对系统不做功,相互间仅存在物质、能量交换,时间无限长后,系统处于平衡态。对此状态,统计物理学建立巨正则系综来描写系统的性质,给出概率分布、配分函数

$$\rho(q, p) = \frac{1}{\tilde{Z}} e^{-\beta E_s - \alpha N}, \quad \tilde{Z} = \sum_i \sum_N e^{-\beta E_i - \alpha N} \quad (7.3.31)$$

利用不同系综的配分函数可以计算在相应不同情况下系统的各种性

质、宏观量与微观量之间的关系,例如通过计算可以找到描写系统无序程度的宏观变量熵 S 与系统微观可能存在的状态数 W 之间的关系

$$S = k \ln \frac{W\{M_k\}}{M!} \quad (7.3.32)$$

其中 $W\{M_k\}$ 为某种分布下,有标记粒子所具有的微观状态数。利用统计物理学可以建立宏观 n 个变量与微观 M 个变量之间关系(这方面的内容在统计物理课程有详细的讨论,严格地讲,现在还没有将其推广到系统科学,还不能算作系统科学的内容。感兴趣的读者可参考任一本统计物理书⁸⁾。

7.3.4 随机层次方法:随机层次演化模型

统计物理学方法目前只适用于讨论平衡状态和近平衡状态下的输运过程。对于一般非平衡状态,特别是讨论远离平衡态的非平衡态系统宏观的性质,上述方法不适用。有人建议采用与平衡态统计物理一样的方法,通过配分函数 Z 、密度矩阵 ρ 等量建立宏观量与微观量的联系,从而分析系统的涨落等性质。前苏联学者祖巴列夫(Zubarev)按此观点进行工作,建立了一套以非平衡统计算符为核心的非平衡统计理论。⁹ 这套理论虽然可以得到不少有益的结果,但是在讨论某些问题时,遇到了一定困难。更多的学者认为:远离平衡态的系统,各处粒子数密度虽然满足局域平衡假设,但是也不能得到密度函数的形式,因此不能像平衡态统计那样建立微观量与宏观量之间的联系,也不能由此使人们对系统的宏观认识更深入一步。特别是,统计物理方法仅能给出系统某一时刻 t 的状态,给出在此状态下各物理量之间的关系,却无法描写系统的演化行为,无法给出系统性质随时间如何变化。

在宏观层次上反应扩散方程反映系统演化性质不充分,在微观层次上对多数系统人们还无法提出描写系统性质的规范方法。为了解决这一问题,采用在随机层次上描写系统的演化行为是适宜的。一个需要 $6M$ 个变量描写的系统,确定了 n 个宏观变量以后,还有 $6M - n$ 个量可以变化,系统状态必然要受到 $6M - n$ 个变量的影响,而 $6M - n$ 个变量的影响无法逐一确定。因此,把原来描写系统状态的 n 个宏观变量看成随机变量,统一考虑 $6M - n$ 个变量对系统演化的影响,这是解决问题的可行办法。研究系统的演化规律就是分析系统 n 个随机变量满足的演化方程,系统的宏观性质由这些随机变量的平均值确定。由于系统中包含的子系统数目很大,把系统宏观变量看成随机变量的研究方法,虽不是直接从微观分析出发,建立

宏观与微观之间的桥梁,但是这种研究方法比宏观方法深入一步。可以认为建立随机层次系统演化的模型是在宏观、微观两个研究层次之间的一个中间层次模型,是人们为了更彻底地从微观上研究系统,建立微观、宏观之间联系的一个中间台阶。

随机方法是在随机层次上讨论系统的运动,建立随机层次系统模型,采用随机变量描写系统状态,选择随机微分方程来讨论系统的演化,具体方案可以有很多种。通常用主方程来作为描写简单巨系统演化的主要形式,系统状态用概率分布 $P(\{X_j\}, t)$ 表示,其中 $\{X_j\}$ 表示系统状态随机变量的集合, $P(\{X_j\}, t)$ 表示在 t 时刻,系统随机状态变量取值为 $\{X_j\}$ 的概率(对于随机变量连续取值的系统, $P(\{X_j\}, t)$ 表示 t 时刻,随机变量取 $\{X_j\}$ 单位间隔内的概率密度)。本书一般讨论单变量系统,可写为 $P(x, t)$ 。

我们仅讨论系统状态变化符合最简单的马尔可夫过程的演化形式。若一个随机变量的分布函数在变化过程中,某一时刻的取值只决定于它前一时刻的状态,而与以往的历史无关,这样的过程称为马尔可夫过程。马尔可夫过程是无记忆过程、无系统后效性的过程。对于马尔可夫过程可以利用系统的一步转移概率从给定初始状态得到以后所有的状态。布朗运动(Brownian movement)就是一种马尔可夫过程。自然界发生的绝大多数过程都是马尔可夫过程,或可以近似看成马尔可夫过程。

对于此类系统的演化,可以根据概率守恒得到系统概率分布 $P(x, t)$ 满足的运动方程——主方程。对于随机变量离散取值的系统,可得到:

$$\frac{dP(x, t)}{dt} = \sum_x [W(x' \rightarrow x)P(x', t) - W(x \rightarrow x')P(x, t)] \quad (7.3.33)$$

其中 $W(x' \rightarrow x)$ 表示 t 时刻该系统状态从取值 x' 向取值 x 的转移概率,它反映系统内相互作用的性质,一般与时间无关。 $\sum$ 取和遍及随机变量的所有可能取值。

在随机层次除了主要采用主方程作为系统演化模型以外,人们还根据不同问题和不同需要采用其他的方程。^{10, 11}

(1) 福克尔-普朗克方程。当随机变量 x 连续取值、概率分布函数记为 $P(x, t)$ 时,若已知系统状态平均值所受的漂移力 $f(x)$,同时考虑系统随机涨落强度为 ϵ ,可以列出 $P(x, t)$ 的演化方程:

$$\frac{dP(x, t)}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x}[f(x)P(x, t)] + \frac{1}{2}\epsilon^2 \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial x^2} \quad (7.3.34)$$

称为福克尔-普朗克方程。它是一抛物型偏微分方程,通常 $f(x)$ 是 x 的非

线性函数,则称为非线性漂移项的福克尔-普朗克方程,或简称非线性福克尔-普朗克方程。

(2) 朗之万方程。对于随机变量 x , 若其平均值变化规律已知为

$$\frac{d\langle x \rangle}{dt} = f(\langle x \rangle) \quad (7.3.35)$$

随机扰动满足 $\langle \eta(t), \eta(t') \rangle = \epsilon \delta(t - t')$, $\langle \eta(t) \rangle = 0$, 则随机变量 x 满足方程:

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + \epsilon^{1/2} \eta(t) \quad (7.3.36)$$

称为朗之万方程。

上述三类方程(模型)在所依据的思想和考虑系统的机制上基本一样,但由于方程形式不一样,故其在反映系统演化特点、建立办法、求解难易程度等方面也有所不同。

朗之万方程物理意义明显,它就是在决定论宏观层次的方程(形式与(7.3.36)一样,普利高津称为反应扩散方程)中加上随机项,认为原来宏观变量是随机变量即可。但是求解此类方程很困难,需要应用随机微分方程的性质与解法。

主方程很容易根据概率守恒得到,对于多数系统,能方便地得到主方程具体表达式。但是在不少情况下,它与系统宏观演化方程的关系不易看出,通常是在求解主方程后,才讨论系统随机变量与宏观量之间的联系,而且由于随机变量离散取值,使计算也较困难。

福克尔-普朗克方程是一抛物型偏微分方程,有规范的求解方法,较易得到方程的解,但方程建立必须依赖于系统宏观演化方程,或利用生灭主方程,很难直接在随机层次上建立起方程。

在研究具体问题时,通常是要利用三类模型(方程)之间的等价性,发挥每类方程的优点,综合利用各类方程,最终得到结果。

7.4 系统演化的分析方法

简单巨系统的演化性质一般是由非线性微分方程解的特点来反映的,因此我们讨论系统的性质,也主要是讨论方程解的性质。在数学上非线性微分方程通常无法给出精确解的解析表达式。如何解决这一问题,求出方程解,进而说明系统演化的特点,是简单巨系统理论要解决的问题;现在已经提出多种方法来讨论这一问题。首先,可以利用计算机进行数值模拟,在

较短时间内计算出所给定数学模型的解,且根据需要画出各种图形。这方面工作从理论上讲它属于计算数学,属于计算机科学的内容,系统理论不专门讨论它(在实际应用时,将会大量使用这种方法)。其次,利用微分方程稳定性理论可以定性分析系统性质,它在理论研究以及在实际应用上都有重要的意义,是解决非线性微分方程的重要方法之一。在第3章中讨论的以方程稳定性分析为中心内容,涉及到奇点分析、吸引子、分岔、混沌等内容,以及在离散动态系统中关于迭代方程性质讨论等,很多内容都可以用来分析简单巨系统演化的特点。这一节我们要介绍的是除了数值求解、连续动态系统和离散动态系统讨论方程性质的内容以外,几种处理无法精确求解微分方程的较常见方法。这些方法原来是在不同学科为处理各自碰到的问题而提出来的,我们认为它们作为一种数学分析方法具有普遍意义,可以运用来处理一般的简单巨系统的演化问题,集中在这里介绍。可以预言,随着要处理的简单巨系统实际问题的增多,随着科学的发展,人们还会不断总结出新的处理方法,充实到简单巨系统演化的数学分析内容中来。

7.4.1 微扰论——渐变分析方法

本节以振动方程为例介绍微扰法的基本步骤¹²,假定振动方程为

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \mu x^3 = 0 \quad (7.4.1)$$

其中 μ 为小数 ($0 < \mu < 1$)。

将 x 写成 μ 的幂级数

$$x(t) = x_0(t) + \mu x_1(t) + \mu^2 x_2(t) + \dots \quad (7.4.2)$$

代入(7.4.1)有

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0 + \omega_0^2 x_0 + \mu [\ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 + x_0^3] + \mu^2 [\ddot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 + 3x_0^2 x_1] + \\ O(\mu^2) = 0 \end{aligned} \quad (7.4.3)$$

$O(\mu^2)$ 表示较 μ^2 更高阶的小量,下同。

按 μ 的不同幂次可将(7.4.1)写成微分方程组

$$\ddot{x}_0 + \omega_0^2 x_0 = 0 \quad (7.4.4a)$$

$$\ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = -x_0^3 \quad (7.4.4b)$$

$$\ddot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 = -3x_0^2 x_1 \quad (7.4.4c)$$

(7.4.4a)为标准简谐振动方程, ω_0 为振动频率,解为

$$x_0(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (7.4.5)$$

其中 A 为振幅, φ 为初相位,均由初始条件决定。将解 x_0 代入(7.4.4b),使之成为一个带有驱动项的振动方程

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 &= -A^3 \sin^3(\omega_0 t + \varphi) \\ &= -\frac{3}{4}A^3 \sin(\omega_0 t + \varphi) + \frac{1}{4}A^3 \sin(3\omega_0 t + 3\varphi)\end{aligned}\quad (7.4.6)$$

方程解为

$$\begin{aligned}x_1(t) &= B \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + \frac{3t}{8\omega_0} A^3 \cos(\omega_0 t + \varphi) - \\ &\quad \frac{1}{32\omega_0^2} A^3 \sin(3\omega_0 t + 3\varphi)\end{aligned}\quad (7.4.7)$$

其中 B, φ_1 为由初条件决定的待定常数, 此解中第二项随时间增加而无限增大, 称为久期项。从有关数学理论可知(7.4.1)乃是一个非线性恢复力的振动方程, 其解应反映系统在有限范围内运动, 这里出现矛盾的原因在于解的级数性质。运用微扰论方法求解系统必须解决由于出现久期项而使方程解发散的问题。

在近似求解振动方程中, 如何去掉久期项是使用微扰方法是否能够成功的关键, 在(7.4.7)中希望类似第二项, 即与 t 成正比的项不出现。从系统演化机制上分析, 若外加周期驱动力的频率与系统振动固有频率一致, 则振动振幅不断加大, 直至无穷。对于非线性振动, 由于非线性恢复力的存在, 系统振动变得更加复杂, 它不可能仍以线性恢复力所给出的固有频率 ω_0 振动, 这又给如何判断外界驱动力对系统产生共振作用的部分带来困难。为同时从机制上处理这两方面的问题, 我们首先把系统振动频率 ω 也写成一幂级数, 且当 $\mu = 0$ 时此频率就是 ω_0 , 然后在具体求解 x_1 及后面的方程中, 将驱动力中与固有频率 ω_0 一样的部分之系数取为零。

【例 7.4.1】 求解振动方程(7.4.1) $\ddot{x} + \omega_0^2 x + \mu x^3 = 0$ (7.4.8)

解: 将变量 t 变成新变量 $\tau = \omega t$, 方程为

$$\omega^2 \ddot{x} + \omega_0^2 x + \mu x^3 = 0 \quad (7.4.9)$$

令

$$\begin{aligned}x &= x_0 + \mu x_1 + \mu^2 x_2 + \dots \\ \omega &= \omega_0 + \mu \omega_1 + \mu^2 \omega_2 + \dots\end{aligned}\quad (7.4.10)$$

代入方程为

$$\begin{aligned}\omega_0^2 \ddot{x}_0 + 2\mu \omega_0 \omega_1 \ddot{x}_0 + \mu \omega_0^2 \ddot{x}_1 + \mu^2 \omega_0^2 \ddot{x}_2 + \mu^2 \omega_1^2 \ddot{x}_0 + 2\mu^2 \omega_0 \omega_1 \ddot{x}_1 + \\ \mu x_0^3 + 2\mu^2 \omega_0 \omega_2 \ddot{x}_0 + 3\mu^2 x_0^2 \ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_0 + \mu \omega_0^2 x_1 + \mu^2 \omega_0^2 x_2 = 0\end{aligned}\quad (7.4.11)$$

μ 的同幂次项应相等, 得到微分方程组

$$\omega_0^2 \ddot{x}_0 + \omega_0^2 x_0 = 0 \quad (7.4.12a)$$

$$\omega_0^2 \ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = -x_0^3 - 2\omega_0\omega_1 \ddot{x}_0 \quad (7.4.12b)$$

$$\omega_0^2 \ddot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 = -3x_0^2 \dot{x}_1 - \omega_1^2 \ddot{x}_0 - 2\omega_0\omega_1 \ddot{x}_1 - 2\omega_0\omega_2 \ddot{x}_0 \quad (7.4.12c)$$

假定开始系统无运动,初始速度为零,即 $t=0$ 时, $x_0(0) = A_0$, $\dot{x}_0(0) = 0$, 从 (7.4.12a) 中解出

$$x_0 = A_0 \cos \tau \quad (7.4.13)$$

代入 (7.4.12b) 有

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + x_1 &= -\frac{1}{\omega_0^2} x_0^3 - 2\frac{\omega_1}{\omega_0} \ddot{x}_0 \\ &= 2\frac{\omega_1}{\omega_0} A_0 \cos \tau - \frac{A_0^3}{\omega_0^2} \left(\frac{1}{4} \cos 3\tau + \frac{3}{4} \cos \tau \right) \end{aligned} \quad (7.4.14)$$

消去久期项,令 $\cos \tau$ 系数为零,则有

$$2\frac{\omega_1}{\omega_0} A_0 = \frac{3A_0^3}{4\omega_0^2}$$

$$\text{即得到对 } \omega_1 \text{ 的限制, } \omega_1 = \frac{3A_0^2}{8\omega_0} \quad (7.4.15)$$

方程 (7.4.14) 成为

$$\ddot{x}_1 + x_1 = -\frac{A_0^3}{4\omega_0^2} \cos 3\tau \quad (7.4.16)$$

$$\text{其形式解为 } x_1 = M \cos \tau + N \sin \tau + F \cos 3\tau \quad (7.4.17)$$

利用初条件 $\dot{x}_1(0) = 0$ (初始系统静止), $x_1(0) = A_1$, 则可得出

$$N = 0, \quad F = \frac{A_0^3}{32\omega_0^2}, \quad M = A_1 - \frac{A_0^3}{32\omega_0^2} \quad (7.4.18)$$

方程 (7.4.12b) 的解为

$$x_1 = \left[A_1 - \frac{A_0^3}{32\omega_0^2} \right] \cos \tau + \frac{A_0^3}{32\omega_0^2} \cos 3\tau \quad (7.4.19)$$

将解 (7.4.19)、(7.4.13) 及式 (7.4.15) 代入方程 (7.4.12c) 并按同样办法, 可得到:

$$\begin{aligned} x_2 = & \left(A_2 + \frac{23A_0^5}{1024\omega_0^4} - \frac{3A_0^2 A_1}{32\omega_0^2} \right) \cos \tau - \frac{3A_0^2}{128\omega_0^4} (A_0^3 - 4A_1\omega_0^2) \cos 3\tau + \\ & \frac{A_0^5}{1024\omega_0^4} \cos 5\tau \end{aligned} \quad (7.4.20)$$

方程(7.4.1)的近似解为方程(7.4.12)三个方程得到解的和:

$$x = x_0 + \mu x_1 + \mu^2 x_2 + \dots$$

其中 ω 也是分别求出 $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 的加权和

$$\omega = \omega_0 + \mu \omega_1 + \mu^2 \omega_2 + \dots$$

上述规范的数学方法是由天文学家林德斯泰特(A. Lindstedt)于1883年提出,庞加莱于1892年完善的,也称为微扰论的林德斯泰特-庞加莱方法(Lindstedt-Poincaré method),它的适用条件是 μ 为小量,否则所选用级数不收敛。

对于 $\mu > 0$,但 μ 不是小量时,舒哈特(J. Shohat)于1944年提出微扰论的另一方法。此时 μ 不是小量,取 $\rho = \frac{\mu}{1+\mu}$,则 ρ 为一正的小量,对 ρ 进行类似于林德斯泰特-庞加莱方法的分析,可得到较好结果。现再讨论形如(7.4.1)的振动方程,仍可写出

$$x = x_0 + \rho x_1 + \rho^2 x_2 + \dots \quad (7.4.21)$$

$$\omega = \omega_0 + \rho \bar{\omega}_1 + \rho^2 \bar{\omega}_2 + \dots \quad (7.4.22)$$

$$\tau = \omega t \quad (7.4.23)$$

$$\text{因为 } \mu = \frac{\rho}{1-\rho} = \rho(1 + \rho + \rho^2 + \dots) \quad (7.4.24)$$

对 ρ 进行类似于林德斯泰特-庞加莱方法的分析,所得结果再换成 μ 的表达式,可得到较好结果。从以上分析可以看到微扰论的思想很简单,在实际应用时主要困难在于计算繁杂,现在解决实际问题时往往利用计算机进行计算,可以得到较好结果。当然微扰论仅适用于没有奇点的系统,若系统演化存在奇点,在奇点附近微扰论方法就不再适用了。

对于更复杂的系统,当它的运动可以看成是多种简单运动的叠加,一般微扰论无法给出较好的结果,这时候可以采用多时间尺度微扰分析方法。多时间尺度方法的思想是将原来时间 t 单变量的函数,看成是多变量时间 t 与 $\varepsilon^n t$ ($n = 1, 2, \dots$) 的函数,实际运算时,只看成双变量 t 与 εt 的函数就可以了。原来对时间 t 的复杂演化特点可以看成对时间 t 与 εt 两变量的简单关系。如天气变化,我们可以从小时来分析天气的日周期变化,也可以从月来分析天气的年周期变化特点,实际天气温度的变化为这两种周期变化的叠加。

7.4.2 平均值分析——变量相关性讨论

平均值方法是讨论系统演化方程的另一种方法¹³。按照数学理论,我

们可以定义一个变量的平均值 $\bar{X}$ 、涨落 $\text{Var}(X)$, 以及两个变量的关联 $\text{Cov}(X, Y)$ 。

【定义】变量 $X(t)$ 在 $t=0$ 到 $t=t$ 时间间隔内的平均值(或称数学期望)记为 $E_t[X]$, 定义为

$$E_t[X] = \frac{1}{t} \int_0^t X(\tau) d\tau \quad (7.4.25)$$

当讨论时间无限长, 且极限 $\lim_{t \rightarrow \infty} E_t[X]$ 存在时, 则此极限被称为对应变量 X 的平均值, 记为 $E[X]$ 或 $\bar{X}$ 。

对于涨落 $\text{Var}(X)$, 以及两个变量的关联 $\text{Cov}(X, Y)$ 的严格定义, 这里不详述, 感兴趣的读者可参考有关书籍。

对函数的导数同样可按上述定义求平均值

$$\begin{aligned} E_t\left[\frac{dX}{dt}\right] &= \frac{1}{t} \int_0^t \frac{dX}{d\tau} d\tau = \frac{1}{t} [X(t) - X(0)] \\ &\leq \frac{1}{t} [\max(X) - \min(X)] \end{aligned} \quad (7.4.26)$$

其中 $\max(X)$ 与 $\min(X)$ 为在 $[0, t]$ 区间上函数 X 的最大值和最小值。若一个演化过程是有限的, 即在整个过程中, 不论 t 取何值, X 的值均不会为无穷, 则可有

$$E\left[\frac{dX}{dt}\right] = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} [X(t) - X(0)] \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} [\max(X) - \min(X)] = 0 \quad (7.4.27)$$

我们下面研究的所有问题都指满足(7.4.27)的情况。利用导数平均值为零的性质, 我们可以讨论某些系统, 特别是一些生物化学系统演化方程的性质。

生物的生存竞争是自然界中最普遍的现象之一, 不仅生物界而且其他如经济、军事、社会等领域的很多现象也都可以建立起与生物界生存竞争类似的模型, 我们这里用平均值方法讨论不同形式的捕食者与被捕食者模型, 找出变量之间或变量与含时参量之间的关系。

洛特卡-沃尔泰拉模型是最简单、最基本的捕食者与被捕食者模型, 对此模型本章前面已作过讨论, 这里不再重述, 仅将其演化方程写出

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = aX - bXY \\ \frac{dY}{dt} = bXY - cY \end{cases} \quad (7.4.28)$$

在这里对方程稍微作一改动:将被捕食者的增长率 aX 改成 $I(t)$, 这可理解为由某种外界因素控制, X 按某已知规律增长; 同时认为被捕食者受到环境影响, 自身存在某一确定的死亡速率 C ; 捕食者的演化机制不变。这样演化方程变为

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = I - (PY + C)X \\ \frac{dY}{dt} = Y(PX - Q) \end{cases} \quad (7.4.29a)$$

$$(7.4.29b)$$

其中 I 是时间函数 $I = I(t)$

此时较难利用定态解的线性稳定性分析方法进行讨论。我们利用平均值方法可有

$$E\left[\frac{1}{Y} \frac{dY}{dt}\right] = P\bar{X} - Q = 0 \text{ 或 } \bar{X} = \frac{Q}{P} \quad (7.4.30)$$

同样

$$E\left[\frac{dY}{dt}\right] = 0 = \bar{Y}(P\bar{X} - Q) + PCov(X, Y) \quad (7.4.31)$$

两式比较可有

$$Cov(X, Y) = 0 \quad (7.4.32)$$

这表明在此模型中虽然 X 、 Y 是被捕食者与捕食者, 但是它们两者之间并无关联, 即一物种数量的变化并不影响另一物种数量的变化, 各自以自身的规律趋近于各自的定态解。从(7.4.29a)还可有

$$E\left[\frac{dX}{dt}\right] = 0 = \bar{I} - (P\bar{Y} + C)\bar{X} - PCov(X, Y)$$

将(7.4.32)代入可有

$$\frac{\bar{I}}{\bar{X}} = P\bar{Y} + C \quad (7.4.33)$$

利用(7.4.30)可有

$$\bar{Y} = \frac{\bar{I}}{Q} - \frac{C}{P} \quad (7.4.34)$$

容易看出此系统 X 、 Y 变量的平均值与 I 为常数时的定态解一样, 在 I 随时间变化时, 只需将 $I(t)$ 用其平均值 I 代替即可。我们考虑这可能与在 I 为常数时方程定态解 X^* 、 Y^* 是稳定的有关系。

进一步由(7.4.29a)可有

$$E\left[\frac{1}{X} \frac{dX}{dt}\right] = 0 = E\left[\frac{I}{X}\right] - (P\bar{Y} + C) = \bar{I} \left(\overline{\frac{1}{X}}\right) + Cov\left(I, \frac{1}{X}\right) - (P\bar{Y} + C)$$

或

$$I\left(\overline{\frac{1}{X}}\right) = P\bar{Y} + C - \text{Cov}\left(I, \frac{1}{X}\right) \quad (7.4.35)$$

根据函数性质分析[在某一闭区间内,当函数为单调增函数,且 $f'(x) < 0$ 、 $f''(x) < 0$ 时,则有 $\overline{f(x)} > f(\bar{x})$],可有

$$\overline{\left(\frac{1}{X}\right)} > \left(\frac{1}{\bar{X}}\right) \quad (7.4.36)$$

比较(7.4.35)与(7.4.33)可知,仅在 $\text{Cov}\left(I, \frac{1}{X}\right) < 0$ 时才能使(7.4.36)成立,

即被捕食者数量 X 与其增长率 I 是正相关的(因为 I 与 $\frac{1}{X}$ 应是负相关的)。

再讨论 I 与 Y 之间关系,用 $(PX - Q)$ 乘(7.4.29b)可有

$$(PX - Q)\frac{dY}{dt} = Y(PX - Q)^2$$

考察此式右端, Y 取值非负, $(PX - Q)^2$ 不可能有负值,故取平均值时为正。

$$E\left[(PX - Q)\frac{dY}{dt}\right] = PE\left[X\frac{dY}{dt}\right] - QE\left[\frac{dY}{dt}\right] > 0 \quad (7.4.37)$$

利用变量导数平均值为零可有

$$E\left[X\frac{dY}{dt}\right] > 0 \quad (7.4.38)$$

再利用 XY 积函数变化的有界性可有

$$E\left[Y\frac{dX}{dt}\right] < 0 \quad (7.4.39)$$

(7.4.29a)乘 Y 后取平均值并利用(7.4.39)可有

$$\text{Cov}(Y, I) - P\text{Cov}(Y, XY) - C\text{Cov}(X, Y) < 0 \quad (7.4.40)$$

(7.4.29b)乘 Y 再取平均可有

$$P\text{Cov}(Y, XY) - Q\text{Var}(Y) = 0$$

将此关系及(7.4.32)代入(7.4.40)可有

$$\text{Cov}(Y, I) - Q\text{Var}(Y) < 0 \quad (7.4.41)$$

此关系表明可存在两种情况

$$\text{Cov}(Y, I) < 0 \quad (7.4.42)$$

或

$$0 < \text{Cov}(Y, I) < Q\text{Var}(Y) \quad (7.4.43)$$

即得到结论:外界控制被捕食者 X 增长的速率函数 I 与捕食者 Y 之间如果不是负关联,其关联的程度也不能大于捕食者 Y 的涨落量与 Q 的乘积。这

样的结论在一般的讨论中是不易得出的。

7.4.3 算子结构分析

简单巨系统演化用其变量的概率密度 $P(x, t)$ 所遵从的微分方程描写时, 通常讨论福克尔-普朗克方程, 其形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = -\frac{\partial}{\partial x} [c_1(x) P(x, t)] + \frac{1}{2} \epsilon^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} P(x, t) \quad (7.4.44)$$

其中 ϵ 为小量, $c_1(x)$ 为反映系统内子系统之间相互作用规律的关系式, 一般来讲 $c_1(x)$ 为 x 的非线性函数, 方程 (7.4.44) 不存在精确解。我们在这里介绍对此类方程算子结构分析的一般解法, 并讨论一些简单的具体问题。⁵ 对方程算子结构的分析, 使我们不仅可以得到方程解的具体形式, 而且可以了解到方程所反映的演化系统的对称性。对称性是物理学研究物质运动规律的一个非常重要的工具和手段, 此部分内容可以作为进一步分析系统演化对称性的基础。

(1) 方程形式解

令 $\hat{L} = -\frac{\partial}{\partial x} [c_1(x)] + \frac{1}{2} \epsilon^{1/2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ 是一作用在函数空间变量 $P(x, t)$ 上与时间无关的算子, 则 (7.4.44) 可以写成

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = \hat{L} P(x, t) \quad (7.4.45)$$

并得到形式解

$$P(x, t) = e^{t\hat{L}} P(x, 0) \quad (7.4.46)$$

其中 $P(x, 0)$ 为方程初条件。(7.4.45) 是否可有一般意义下的解的表达式, 关键在于 (7.4.46) 中指数算子 $e^{t\hat{L}}$ 对函数 $P(x, 0)$ 的作用能否求出来。算子结构分析是指对算子 $\hat{L}$ 进行分析, 最终将指数算子 $e^{t\hat{L}}$ 对函数 $P(x, 0)$ 的作用结果表示出来, 从而得到方程解 (7.4.46) 的具体表达式, 并对系统对称性有所了解。通常将算子 $e^{t\hat{L}}$ 写成几个基本算子之和, 这里为简单起见我们仅写出具体简单的情况, 即

$$G = \exp[ag^3 + bg^+ + cg^-] = e^{a'g^+} e^{b'g^-} e^{\tau'g^3} \quad (7.4.47)$$

a', b', τ' 与 a, b, c 之间存在确定的关系, 再若每一个基本算子 $e^{t\hat{L}}$ 对函数 $f(x)$ 的作用又是已知的, 即有

$$e^{t\hat{L}} f(x) = g(x) \quad (7.4.48)$$

那么方程(7.4.45)的解就可以显式写出来;在计算中特别要注意算子乘积的次序不能颠倒。

(2) 对具有线性漂移项 $c_1(x) = \gamma x$ 的福克尔-普朗克方程

按照算子分析方法,此时对应的算子 $\hat{L}$ 为

$$\hat{L} = -\frac{\partial}{\partial x}(\gamma, x) + \frac{1}{2}\epsilon^{1/2}\frac{\partial^2}{\partial x^2} = -\gamma x \frac{\partial}{\partial x} - \gamma + \frac{1}{2}\epsilon^{1/2}\frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (7.4.49)$$

$$\text{令 } A = \frac{1}{2}x \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{4}, C^- = -\frac{\partial^2}{\partial x^2}, C^+ = \frac{x^2}{4}$$

福克尔-普朗克方程形式解,按算子拆解过程可写为

$$\begin{aligned} P(x, t) &= e^{t\hat{L}}P(x, 0) = \exp\left\{-t\gamma x \frac{\partial}{\partial x} - t\gamma + \frac{t}{2}\epsilon^{1/2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right\}P(x, 0) \\ &= \exp\left\{-2t\gamma A - \frac{1}{2}t\gamma - \frac{t}{2}\epsilon^{1/2}C^-\right\}P(x, 0) \\ &= e^{-\frac{1}{2}t\gamma}e^{a'C^+}e^{b'C^-}e^{c'A}P(x, 0) \end{aligned} \quad (7.4.50)$$

将对应的 $a = -2t\gamma, b = 0, c = -\frac{t}{2}\epsilon^{1/2}$ 代入相应关系中可求出 a', b', τ'

$$\begin{aligned} \mu &= \sqrt{(a/2)^2 + bc} = t\gamma \\ e^{-\frac{\tau'}{2}} &= \text{ch}(t\gamma) + \text{sh}(t\gamma) = e^{t\gamma} \\ b' &= e^{t\gamma}\left(\frac{-\epsilon^{1/2}}{2\gamma}\right)\frac{1}{2}(e^{t\gamma} - e^{-t\gamma}) = \frac{-\epsilon^{1/2}}{4\gamma}[e^{2t\gamma} - 1] \\ a' &= 0, \tau' = -2t\gamma \end{aligned} \quad (7.4.51)$$

代入(7.4.50)得到方程解为

$$\begin{aligned} P(x, t) &= e^{-\frac{1}{2}t\gamma} \exp\left[\frac{\epsilon^{1/2}}{4\gamma}(e^{2t\gamma} - 1)\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right] e^{-t\gamma x \frac{\partial}{\partial x}} e^{-\frac{1}{2}t\gamma} P(x, 0) \\ &= e^{-t\gamma} \exp\left[\frac{\epsilon^{1/2}}{4\gamma}(e^{2t\gamma} - 1)\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right] \exp\left[-t\gamma x \frac{\partial}{\partial x}\right] P(x, 0) \end{aligned} \quad (7.4.52)$$

利用数学上已知的公式

$$e^{a\frac{\partial^2}{\partial x^2}}f(x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi a}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(x-y)^2}{4a}\right\} f(y) dy \quad (7.4.53)$$

$$e^{a\frac{\partial}{\partial x}}f(x) = f(x+a) \quad (7.4.54)$$

$$e^{ax\frac{\partial}{\partial x}}f(x) = f(e^ax) \quad (7.4.55)$$

(7.4.52) 可写为

$$\begin{aligned}
 P(x, t) &= e^{-\gamma t} \exp\left[\frac{\epsilon^{1/2}}{4\gamma}(e^{2\gamma t} - 1) \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right] P(e^{-\gamma t} x, 0) \\
 &= \frac{e^{-\gamma t}}{\sqrt{4\pi \frac{\epsilon^{1/2}}{4\gamma}(e^{2\gamma t} - 1)}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-(x-y)^2}{\frac{\epsilon^{1/2}}{\gamma}(e^{2\gamma t} - 1)}\right] P(e^{-\gamma t} y, 0) dy \\
 &= \frac{e^{-\gamma t}}{\sqrt{\frac{\pi}{\gamma} \epsilon^{1/2}(e^{2\gamma t} - 1)}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{(x-y)^2}{\frac{\epsilon^{1/2}}{\gamma}(1 - e^{2\gamma t})}\right] P(e^{-\gamma t} y, 0) dy
 \end{aligned}
 \tag{7.4.56}$$

此式即为线性漂移项 $c_1(x) = \gamma x$ 的福克尔-普朗克方程的精确解, 画出数值计算上方程解的图形与直接从福克尔-普朗克方程解(7.4.56)所得到结果一致。

综上所述, 方程(7.4.44)是否可有一般意义下的解的表达式, 关键在于(7.4.45)中指数算子 $e^{t\hat{L}}$ 对函数 $P(x, 0)$ 的作用能否求出来。算子结构分析是指对算子 $\hat{L}$ 进行分析, 最终将指数算子 $e^{t\hat{L}}$ 对函数 $P(x, 0)$ 的作用结果表示出来, 从而得到方程(7.4.44)的解, 并对系统对称性有所了解。如果算子 $e^{t\hat{L}}$ 可以写成几个基本算子之和即

$$e^{t\hat{L}} = \prod_i e^{t\hat{L}_i} \tag{7.4.57}$$

且每一个基本算子 $e^{t\hat{L}_i}$ 对函数 $f(x)$ 的作用是已知的, 即有

$$e^{t\hat{L}_i} f(x) = g(x) \tag{7.4.58}$$

那么方程(7.4.44)的解就可以显式写出来; 如果(7.4.57)、(7.4.58)可以近似写出来, 那么方程(7.4.44)的解就可以近似地给出来; (7.4.57)、(7.4.58)中只要有一个式子无法得到, 就无法给出方程(7.4.44)解的表达式。

7.5 简单巨系统理论的应用

简单巨系统理论是在对具有多个子系统, 且子系统相互作用简单的一类系统演化行为进行综合概括后得出的。前面我们已经讲过简单巨系统是一种模型。一个客观存在的实际系统, 符合简单巨系统的条件, 就可以按照简单巨系统理论进行处理。客观世界中大多数系统不符合简单巨系统要求

的条件,严格讲不能按照简单巨系统的理论进行处理,但是我们进行某些近似的简化,使之符合简单巨系统的要求,就可以按照简单巨系统的理论进行处理。在实际应用时,并不是先按照简单巨系统的定义,判断一个系统是否属于简单巨系统,然后对已经确认属于简单巨系统的实际系统,再运用简单巨系统理论进行分析讨论。在大多数情况下,人们采取的办法是在不能有充分的理由说明所研究的系统一定是简单巨系统前,就按照简单巨系统理论建立模型,并进行求解,再根据计算结果给出系统演化的性质。如果通过计算给出的结果与实际情况相符,则表明按照简单巨系统的办法可以解决此类系统演化问题;否则,表明此实际系统不属于简单巨系统,简单巨系统的理论不适用,那就需要修正模型,重新进行研究。一些复杂的社会系统,其运动变化规律很难完全了解清楚,不属于简单巨系统,应该按照复杂巨系统的办法——从定性到定量的综合集成方法——来处理。然而,只要我們要求不太高,对问题进行适当的简化,也可以运用简单巨系统的理论进行分析。这样通过简单巨系统理论解决部分问题,给出这一复杂系统的部分性质,我们认为也是简单巨系统的应用,并说这样的复杂系统可以用简单巨系统理论来讨论它的性质。下面我们通过两个简单的例子,来说明如何运用简单巨系统理论对于社会系统进行分析。

讨论实际系统的演化性质可分为建立模型、求解模型、根据解来讨论系统性质几个步骤,其中最重要的、在一般书中讲授也最少的是关于建立模型的讨论。我们在这里分析实际系统演化时,将把主要精力放在介绍对所给出的实际系统如何讨论、分析,并建立起简单巨系统的模型,使我们了解、掌握对一个具体问题如何进行研究,并能看到利用简单巨系统演化理论得出了系统哪些性质。

虽然建立模型主要根据对实际问题的内容进行分析,但每一种理论有它自身理论的框架与特点,建立模型往往需要根据该理论的框架和特点进行。牛顿力学理论研究在外力作用下系统机械运动的规律,因此在建立实际系统模型时就着重分析系统受外力情况,并尽量设法描写系统整体的位置与速度。控制理论研究系统在某些控制参量作用下运动变化的特点,因此在建立模型时一定要选择出控制参量,并主要分析控制参量与系统状态之间的联系。简单巨系统理论与上面列举的两个理论不同,简单巨系统的子系统数目多,子系统之间作用一般并不复杂,建立系统模型的过程和所建立的演化方程没有确定的模式或要求,但有一点我们要明确指出:简单巨系

统的演化方程必须是非线性的微分方程。从系统演化的性质来分析,只有非线性微分方程才存在多个定态解,才能反映系统从无序向有序状态的演化,也才能更有效地体现出简单巨系统理论在求解模型时所使用的如线性稳定性分析、平均值方法、微扰论方法、微分方程算子结构等方法的优点。下面我们仅讨论我国人口空间分布及德国经济发展投资情况两个例子,并着重从建立模型、分析计算两个侧面进行讲解。

7.5.1 建立模型

7.5.1.1 人口空间分布

我国宋健等人在人口控制方面作了大量的工作,得到了科学界的普遍承认^[4],这些工作也是系统科学理论对社会系统的具体应用之一。这里介绍另一项已做过的工作。此工作主要是研究人口的空间分布,研究由于经济发展影响人口迁移造成空间分布上的变化。我们将人口系统看成是由各种不同人口密度地区的人口(子系统)组成的复杂系统,各个地区的人口数量是描述系统状态的重要变量,各地区人口可以相互迁移。在系统演化机制上,认为人口数量变动、人口迁移主要是由经济原因造成的,因此在我们研究的系统中,经济也是一个状态变量;然而由于我们研究的重点是人口的变化,经济只作为一个影响人口发展变化的因素,故并不需要详细地将经济分成若干具体行业,仅将经济作为一个整体变量,研究它的发展变化就可以了。在实际系统中,限制经济发展的因素很多,我们也不研究资源、资金、技术水平等对经济发展的影响,仅讨论人口数量对经济发展的影响,讨论由于劳动力数量多少对经济发展的制约。根据我国实际情况(这里介绍的是我们在改革开放初期所作的工作,当时农村人口基本在土地上进行农业生产,人口的流动和迁移还主要受户口政策的制约),我们将讨论的重点放在城镇,研究城镇人口的变化,给出城镇人口与经济发展的关系,进而得出由于人口的变动影响到粮食供应的调配问题。

我们将某城镇 I 的人口 p_i 分成在业人口 X_i 与非在业人口 n_i 两部分,认为总人口 p_i 演化属于一般自我繁殖,可写成马尔萨斯(Malthus)人口方程形式

$$\frac{dp_i}{dt} = \beta p_i \quad (7.5.1)$$

在业人口 X_i 的数量多少与经济变量 J_i 有直接密切关系,非在业人口 n_i 的数量变化与经济无直接关系。人口空间分布的变化不仅决定于当地人口增

减,而且与人口迁移有很密切的关系,人口迁移也主要受各地经济发展不平衡所影响。我们假定经济仅影响失业人口 n_i 的迁移,而在业人口在失去工作后才能进行迁移。从统计数据中可以发现,在业人口 X_i 数量的变化存在类似 S 型的发展曲线,我们采用逻辑斯谛方程来描写它的演化,在具体使用时,还需要根据实际进行适当改进和推广。对于逻辑斯谛方程可以从两个角度来分析它对变量 X 增长的描述,其方程式右端,因子 X 表明增长的动力,因子 $(N - X)$ 表明增长的可能、增长的余地。这里在业人口 X_i 的增加,实质上是由非在业人口 n_i 转化而来的,故在其方程中表示增长动力来源 X_i 的位置,应由非在业人口数 n_i 代替,即写成

$$\frac{dX_i}{dt} = \epsilon n_i (N - X_i) \quad (7.5.2)$$

其中 ϵ 为 X_i 增长速度系数, N 为环境限制因子,表示 X_i 增长的最大极限。

非在业人口 n_i 的演化可以分成两部分,一部分是单纯由出生率、死亡率决定的,它可以通过总人口 p_i 及在业人口 X_i 两部分人口的变化率得出;另一部分是由于人口迁移造成的。人口迁移在反映不同地区、不同时间人口数量变化上起着非常大的作用,在这个实际问题的模型中,主要的工作也在于对人口迁移问题的讨论。我们把某一地点非在业人口 n_i 的变化率写为

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{dp_i}{dt} - \frac{dX_i}{dt} + MG_i^{\text{in}} - MG_i^{\text{out}} \quad (7.5.3)$$

其中 MG_i^{in} 和 MG_i^{out} 分别表示向 i 地点迁进和迁出的非在业人口对其变化率的影响。我们采用吸引力的方法来描述人口迁移的机制。某一地点迁进人口的多少由该地对其他各地人口的吸引力的大小来表示,即写为

$$MG_i^{\text{in}} = \xi \sum_{j \neq i} n_j \frac{V_{ij}}{\sum_{k \neq j} V_{kj}} \quad (7.5.4)$$

而某地迁出人口的多少,则由外地对该地吸引力的大小来表示:

$$MG_i^{\text{out}} = \xi n_i \sum_{j \neq i} \frac{V_{ji}}{\sum_{k \neq j} V_{jk}} \quad (7.5.5)$$

其中 ξ 为比例系数, V_{ij} 表示 i 点对 j 点人口的吸引力。在我们这里所分析的城镇人口迁移问题上,认为人口迁移主要是由经济原因引起的,非在业人口 n_i 的迁移目的是为了寻找工作,某一个地方 i 的工作岗位有空缺,缺乏劳动力,则该地对其他地点非在业人口 n_i 的吸引力就大。将此定性分析定量

化,用比例(J_i/X_i)来表示*i*点工作岗位数空缺额的多少,其中 J_i 表示*i*点所具有的工作岗位数。人口迁移还受地点远近及该地生活条件好坏的影响,地点远近对人口迁移的影响我们取地理学上的负指数规律 $\exp(-\phi d_{ij})$ 表示,其中 d_{ij} 为两地之间的距离;生活环境的好坏用当地总人口数多少 p_i 表示,某地人口多,当地生活环境会好一些,人口迁移吸引力大一些;人口少反映当地生活环境差一些,人口迁移吸引力小一些。

为了更好地反映吸引力的机制,我们进一步分析发现,工作岗位数的多少是通过人的认识了解程度来影响迁移的,人们了解、相信工作职位数的多少变化,则工作岗位数对吸引力的影响就大,人们不太了解或相信工作岗位的缺盈情况,则工作岗位数对吸引力的影响就小。为此我们用指数因子 α ,以 $(J_i/X_i)^\alpha$ 形式表示上述分析。将所有这些机制合起来考虑可写成公式

$$V_{ij} = (J_i/X_i)^\alpha p_i \exp(-\phi d_{ij}) \quad (7.5.6)$$

对于某一地区工作岗位数 J_i 的变化也同样采取逻辑斯谛方程的形式

$$\frac{dJ_i}{dt} = kJ_i(M_i - J_i) \quad (7.5.7)$$

其中 M_i 表示对*i*点工作岗位数发展的限制。 M_i 是由生产的需求所决定的。80年代初,在我国当时计划经济体制下,国家为了控制城镇中吃商品粮的人数,工作岗位数的发展潜力也是由国家提出的,每年劳动部门提供的招工指标就具体地规定了工作岗位数增加的可能性。

方程(7.5.2)、(7.5.3)、(7.5.7)及函数表达式(7.5.4)、(7.5.5)、(7.5.6)构成了城镇人口发展演化的数学模型。模型中的变量是各省市的在业人口 X_i 、非在业人口 n_i 以及工作岗位数 J_i 三类,实际计算时分析中国29个省、市、自治区,则变量为 $29 \times 3 = 87$ 个。方程中的参数比较多,我们根据情况分别处理。对于各省市人口自然增长率 β_i 由人口统计数据中得到,工作岗位发展潜力 M_i 由国家规定的各省、市招工指标给出,在进行数据拟合时,将这些数据按需要代入方程即可;在我们进行人口发展预测时,首先选取前面已经给出的每个省市各年的数据 β_i 、 M_i 分别进行平均,再用平均值作为预测时的外生参数代入方程。除了上述分析的参数外,数学模型中还有4个参数 α 、 ε 、 κ 、 ξ (由于我们不考虑距离远近对人口迁移的影响,取 $\phi = 0$),这4个参数是方程中变量的标度因子,不能由统计数据直接给出,其大小决定于变量单位的选取,需要通过计算机模拟得到。

我们可以看到上述城镇人口空间分布演化模型具有以下特点:

(1) 模型简单。模型的结构简单,分析人口变化除了考虑人口的自然增长外,主要分析经济和人口之间的关系,用人口、经济之间的自组织作用来反映人口的增长。这样的模型既不会因单纯考虑人口出生率、死亡率很难分析人口空间分布的演化规律,也不会由于考虑因素过多,使分析无从下手。

(2) 模型有深刻的动力学基础。动力学模型依赖于对系统结构的分析,人口空间分布演化机制,仅与中国社会结构、组织关系、经济和人口的各自发展规律及相互联系有关,它不会因各省具体情况的差别而有所不同。在建立模型时,只分析系统的结构关系,不考虑具体数据,这与一般系统工程方法(比如采用投入产出法等分析问题时,主要依据数据来给出各量之间的关系)不同。这表明模型给出了系统演化的规律,各省遵从的规律应该一样,不会因为各省人口多少及经济发展情况不同而不同。

(3) 通过调节参数实现对系统演化的控制。在建立模型时,考虑到系统的非线性性质,所建立的模型用非线性的微分方程来表示,微分方程的具体形式为逻辑斯谛方程。在模型中,没有随时间变化的控制参量,改变系统的演化性质及轨道要依靠改变参数来实现。在不同参数控制下系统实现不同演化,也被看成对系统的控制,但这种控制是一个自组织控制。

7.5.1.2 经济投资系统演化

用简单巨系统的演化理论分析经济系统是系统理论的一个主要应用方向。我们选择联邦德国哈肯学派的魏德利希及黑格所讨论的德国经济为例进行分析¹⁵。研究对象是德国经济选择战略投资情况,并以此来研究德国经济问题。战略投资的数量及构型有助于我们讨论固定资本存量变化及其分布情况。通常人们把投资分成适应性投资与主动性投资两类,适应性投资是根据当时的政治、科技、经济等社会条件,投资者必须进行的投资行为;主动性投资完全是由企业家本身的思想、意愿来决定的投资,它受投资者个人的偏好、灵活性影响。在一个短时期内政治条件、科技条件一般不改变,适应性投资可认为是不变化的,而讨论主动性投资就能反映战略投资的情况。以不同投资决策形成不同投资集团为特征的投资者构形分布是我们描写经济系统特征的变量。我们主要研究在一相对短的时期内主动性投资的变化情况。

我们仍主要讨论如何建立模型。假定仅存两种类型的主动性投资可供选择:一个是合理型投资(rationalizing investment)用 $R(t)$ 表示,它指为了维

持原有产品的生产所必须进行的投资,像设备的维修、原料的购买、生产者的工资增加等;另一个是发展型投资(expansive investment)用 $E(t)$ 表示,它指为扩大再生产所需要进行的投资,如改造设备、新建厂房、建立生产线、人员培训等。在一般情况下两者都有一正常值,记为 R_0 、 E_0 ,不同时刻某一类投资者的投资数目均在其各自的平均值附近波动,即投资者根据经济发展不同时期的不同情况,所进行的投资 $E(t)$ 、 $R(t)$ 围绕着平均值 E_0 、 R_0 在不断地变化。我们仅关心投资比例的变化情况,再假定投资总量 I 是个常量,可有如下关系:

$$I = R(t) + E(t) \quad (7.5.8)$$

$$\begin{cases} R(t) = R_0 - B(t) \\ E(t) = E_0 + B(t) \end{cases} \quad (7.5.9)$$

其中 $B(t)$ 是围绕平均值的涨落,其值可正可负, $B(t) > 0$ 表示发展型投资比例比平均值有所增加, $B(t) < 0$ 表示发展型投资比例比平均值有所减少,且

$$-E_0 < B(t) < R_0 \quad (7.5.10)$$

定义投资比例结构参数;

$$\begin{aligned} Z(t) &= \frac{E(t) - R(t)}{E(t) + R(t)} = \frac{E(t) - R(t)}{I} = \frac{E_0 - R_0}{I} + \frac{2B(t)}{I} \\ &= \frac{E_0 - R_0}{I} + z(t) \end{aligned} \quad (7.5.11)$$

$z(t) = \frac{2B(t)}{I}$ 是我们讨论的基本变量。这里不再分析得到 $z(t)$ 以后,如何进一步分析经济的发展,可参考有关文献。为讨论 $z(t)$ 的变化,我们假定投资者数目固定(投资者可以是个人、企业、集团等各种法人)为 $2N$,并且假定 $2N$ 个投资者每人只能有一个投资方案,或者是发展型投资,或者是合理型投资,共 $2N$ 个方案。一个投资方案的平均投资量为 $i = I/2N = e_0 + r_0$, r_0 和 e_0 分别表示一个投资方案中 R 型和 E 型的平均投资量。由于投资者的偏好, E 型和 R 型两类投资方案的个人投资量 I 也可以分成两类投资的数量,它们分别为:

$$\text{E 型投资者: } i = e_E + r_E, e_E = e_0 + b, r_E = r_0 - b \quad (7.5.12)$$

$$\text{R 型投资者: } i = e_R + r_R, e_R = e_0 - b, r_R = r_0 + b \quad (7.5.13)$$

其中 $b > 0$ 。假定 E 型投资者人数为 $n_E(t)$, R 型投资者人数为 $n_R(t)$, 则 $n_E(t) + n_R(t) = 2N$ 。在时刻 t , 数组 $\{E(t), R(t)\}$ 表示投资结构, $Z(t)$ 表

示投资结构比例参数;而数组 $\{n_E(t), n_R(t)\}$ 表示不同类型投资者的分布,即投资构形。定义

$$n(t) = \frac{n_E(t) - n_R(t)}{2} \quad (7.5.14)$$

$n(t)$ 的增加或减少反映投资构形的变化。为计算方便,我们选用归一化变量——投资者构形指数

$$x(t) = \frac{n(t)}{N} \quad -1 \leq x(t) \leq 1 \quad (7.5.15)$$

寻找投资结构 $z(x)$ 与投资者构形指数之间的关系,利用(7.3.4)至(7.3.8)可以推得

$$z(t) = \frac{4Nb}{I} x(t) \quad (7.5.16)$$

讨论投资者构形指数 $x(t)$ 就可以得到投资额比例参数 $z(t)$ 。

采用随机理论来描述这一问题。投资者构形的概率分布可写为 $P(n_E, n_R; t) \equiv P(n, t)$, 显然它满足概率分布的归一化条件

$$\sum_{n=-N}^N P(n, t) = 1 \quad (7.5.17)$$

投资者构形的改变是投资趋向改变引起的,我们把一个投资者投资趋向的改变记为

$$\begin{aligned} P_{R \rightarrow E}[n_E, n_R] &\equiv P_{\uparrow}(n) \\ P_{E \rightarrow R}[n_E, n_R] &\equiv P_{\downarrow}(n) \end{aligned} \quad (7.5.18)$$

上边两式分别表示一个 R 型投资者转变为 E 型投资者的可能性,以及一个 E 型投资者转变为 R 型投资者的可能性。构形概率分布 $P(n, t)$ 的转移概率由一个投资者转变的可能性与可以转变态度的投资者数目之积表示,即

$$\begin{aligned} W_{\uparrow}(n) &= n_R P_{\uparrow}(n) = (N - n) P_{\uparrow}(n) \\ W_{\downarrow}(n) &= n_E P_{\downarrow}(n) = (N + n) P_{\downarrow}(n) \end{aligned} \quad (7.5.19)$$

在假定每一时刻仅可有一位投资者改变态度的条件下,可得到 $P(n, t)$ 变化遵守的主方程为

$$\begin{aligned} \frac{dP(n, t)}{dt} &= [W_{\uparrow}(n-1)P(n-1, t) + W_{\downarrow}(n+1)P(n+1, t)] - \\ &\quad [W_{\uparrow}(n)P(n, t) + W_{\downarrow}(n)P(n, t)] \end{aligned} \quad (7.5.20)$$

上式右端第一项表示单位时间流向 $P(n, t)$ 的概率流,第二项表示离开 $P(n, t)$ 的概率流。(7.5.20)为离散连续两类变量的微分方程,不好求解,对此最简单的办法是计算其平均值所满足的方程。

(7.5.20) 两端乘上 n 并对 n 取和, 在取近似条件 $\langle P_{\uparrow}(n) \rangle \approx P_{\uparrow}(\langle n \rangle)$, $\langle P_{\downarrow}(n) \rangle \approx P_{\downarrow}(\langle n \rangle)$, $\langle nP_{\uparrow}(n) \rangle \approx \langle n \rangle P_{\uparrow}(\langle n \rangle)$, $\langle nP_{\downarrow}(n) \rangle \approx \langle n \rangle P_{\downarrow}(\langle n \rangle)$ 后, 并采取简单记号, 用 n 代替 $\langle n \rangle$, x 代替 $\langle x \rangle$ 得到:

$$\frac{d}{dt}x(t) = K(x(t)) \quad (7.5.21)$$

其中驱动力 $K(x(t))$ 的具体形式是

$$K(x(t)) = (1-x)P_{\uparrow}(Nx) - (1+x)P_{\downarrow}(Nx) \quad (7.5.22)$$

而一个投资者的转移可能性 $P_{\uparrow}(n)$, $P_{\downarrow}(n)$ 除与 n 有关外, 还由互变因子 (alternator) δ 和协调因子 (coordinator) κ 决定。参量 δ 表示投资转向, $\delta > 0$ 转向 E 型投资, $\delta < 0$ 转向 R 型投资。参量 κ 反映一个投资者愿意追随其他投资者改变自己投资方向的意愿的强弱, 它给出投资者采取同一趋向的量值。根据实际参量性质的分析, 我们采用

$$\begin{aligned} P_{\uparrow}(x, \delta, \kappa) &= v \exp(\delta + \kappa x) \\ P_{\downarrow}(x, \delta, \kappa) &= v \exp[-(\delta + \kappa x)] \end{aligned} \quad (7.5.23)$$

于是驱动力 K 可写为

$$\begin{aligned} K(x, \delta, \kappa) &= (1-x)v \exp(\delta + \kappa x) - (1+x)v \exp[-(\delta + \kappa x)] \\ &= 2v[\text{sh}(\delta + \kappa x) - x \text{ch}(\delta + \kappa x)] \end{aligned} \quad (7.5.24)$$

其中 v 是标度因子, 它因单位选取不同而取不同的值。

经济投资者的互变因子也要变化, 它决定于投资状况与形势, 我们还必须给出投资互变因子 $\delta(t)$ 的演化规律。为使系统演化的方程形式简单, 我们采用下面形式来描写 $\delta(t)$ 随时间的变化

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\delta(t) &= \mu[\delta_0 - \delta(t)] \exp[-\beta x(t)] - \mu[\delta_0 + \delta(t)] \exp[\beta x(t)] \\ &= -2\mu[\delta_0 \text{sh}(\beta x) + \delta(t) \text{ch}(\beta x)] \end{aligned} \quad (7.5.25)$$

其中 $\mu > 0$, $\beta > 0$, $\delta_0 > 0$ 。 δ_0 称为战略决策幅度, 可以被看作是互变因子 δ 变化范围的容许值, β 称为趋势反转速度参量, 它反映 δ 随 x 变化的快慢; μ 称为战略灵活性参量, 描写投资者转变投资类型的灵活程度, 这样做, 可得到一个与 x 形式相类似的方程。

$\delta(t)$ 的方程是人为给定的, 但通过下面分析可以看出, 它在定性上描写了 $\delta(t)$ 的特点。

当 $x=0$ 时, (7.5.25) 变为

$$\frac{d\delta}{dt} = \mu(\delta_0 - \delta) - \mu(\delta_0 + \delta) = -2\mu\delta$$

可以得出 $\delta = Ae^{-2\mu t}$, 随时间演化 $\delta \rightarrow 0$, 即表明, 在两种投资者一样多时, 长时间稳定以后, 投资者投资比例无需变化, 与实际要求一致;

当 $x < 0$ 时, $e^{\beta x} < e^{-\beta x}$, 定性分析时, 可忽略 x 随时间的变化, (7.5.25)

右端双曲函数中, 两项相比可略去 $e^{\beta x}$ 项, 而得近似表达式 $\frac{d\delta}{dt} = \mu\delta_0 e^{-\beta x} - \mu\delta e^{-\beta x}$, 按一阶非齐次微分方程解法可得 $\delta = \delta_0 + \delta_0 e^{\mu e^{-\beta x} t}$, 随时间演化 $\delta \rightarrow \delta_0$, 即表明, 合理型投资者数量多时, 投资者应转向发展型投资, 与实际情况要求一致;

当 $x > 0$ 时, 同样分析, 与实际要求也一致。方程(7.5.21)、(7.5.24)及(7.5.25)构成了投资构形经济演化模型。

7.5.2 分析计算、结果讨论

有了模型以后, 可以进行分析计算, 对于实际问题, 我们主要采用计算机模拟计算的办法来分析。这里略去计算机讨论问题时所需注意的各种技巧, 而直接给出计算得出的结果。

7.5.2.1 人口空间分布

我们利用当时从国家统计局、粮食部、劳动人事部等部门得到的数据, 进行模拟计算, 最终得到模型中所示的参数数值分别是 $\epsilon = 0.00526$, $\kappa = 2.422$, $\zeta = 0.0755$, $\alpha = 0.7$ 。

利用模拟得到上而所列参数, 以 1980 年全国 29 个省、市、自治区城镇人口的统计数据作为初始条件, 对方程(7.5.2)、(7.5.3)及(7.5.7)联立求解, 分别计算出 1981~1984 年 29 个省、市、自治区的城镇人口数, 在与当年实际人口统计数字相比较, 发现误差均在 5% 以内, 这表明我们的模型是可用的。在此基础上, 我们又预测了 2000 年我国各省城镇人口的数量, 以及它们对 1984 年的增长幅度和相对比例, 由表 7.5.1、表 7.5.2 给出。

这些预测结果表明全国城市人口到 2000 年比 1984 年增长 7442 万人, 约增长 40.7%, 其中预测增长比例不到 22% 的有 6 个省区, 它们是内蒙古、吉林、黑龙江、上海、广西、贵州。这些省区在 1984 年统计结果中皆为计算模拟结果低于统计结果达 5.4% 以上的省区。可以认为由于计算结果比统计结果低, 因此按此方式预测的结果也偏少。实际上上述 6 个省区的人口数将会较多超过计算结果, 因此总的增长比例也会高。除了上述较特殊的情况外, 其余各省市人口的预测结果应该是较恰当的。当然, 西藏自治区由于城镇人口基数较少, 只有 28 万, 在全国各省中排在最后, 因此它的增长比

例最高,达到 122.1%,青海省同西藏是属于一个类型的省份,增长幅度也较大。预测结果中 2000 年城镇人口比 1984 年城镇人口增长超过 400 万人的省份除河北外,有山东(706.6 万),广东(805.5 万),江苏(490.8 万),河南(522.1 万),山西(430 万),辽宁接近 400 万(增长 399.2 万)。这些省份除河南、山西外都是我国沿海地区工业比较发达、工业生产总产值排在前几名的省,这些省工业发达,城镇人口增长自然会大一些,不仅绝对数量大,而且相对比例也较高,像广东增长 67.7%,山东增长 82.8%。这是我们分析人口经济关系得到的必然结果。

表 7.5.1 2000 年人口按模型计算结果

人口单位:万人

单位	人口	单位	人口
北京	745.9	河南	1319.1
天津	532.2	湖北	1142.9
河北	1700.8	湖南	884.4
山西	938.1	广东	1994.4
内蒙古	598.9	广西	484.4
辽宁	1818.2	四川	1567.1
吉林	792.4	贵州	372.8
黑龙江	1267.9	云南	554.9
上海	854.4	西藏	62.2
江苏	1433.8	陕西	708.9
浙江	879.3	甘肃	495.9
安徽	915.4	青海	210.9
福建	594.1	宁夏	138.8
江西	670.1	新疆	471.1
山东	1559.6		

这里给出的预测结果表明各省增长比例并不一样,这在一定程度上反映了各地经济发展的不平衡,是比较符合实际的,而一般仅依靠当前人口数

据进行适当外推得到的预测结果则不容易反映各省之间的差别。

表 7.5.2 2000 年与 1984 年人口的比较

人口单位:万人

单位	增长幅度	相对比例	单位	增长幅度	相对比例
北京	189.9	34.2	河南	522.1	65.5
天津	97.2	22.3	湖北	336.9	41.8
河北	987.8	138.5	湖南	198.4	20.9
山西	430	84.6	广东	805.4	67.7
内蒙古	60.9	11.3	广西	38.4	8.6
辽宁	399.2	28.1	四川	264.1	20.3
吉林	-7.6	0	贵州	31.8	9.3
黑龙江	20.9	1.7	云南	189.9	52.0
上海	88.4	11.5	西藏	34.2	122.1
江苏	490.8	52	陕西	212.9	42.9
浙江	293.3	50	甘肃	201.9	68.7
安徽	276.4	43.3	青海	112.9	115.2
福建	166.1	38.8	宁夏	60.8	77.9
江西	122.1	22.3	新疆	111.1	30.9
山东	706.6	82.8	合计	7442.9	40.7

7.5.2.2 经济投资系统演化

经济投资模型给出了一种机制,给出了各个变量之间的关系。对于给出的经济系统演化模型,通过分析可知,选取不同参量值就代表不同的经济发展类型,说明了不同的经济政策产生了不同的发展结果。解析分析和数值模拟都可以得到在参量 κ 、 δ_0 较小时, x 、 δ 的演化结果均为零,达到一种稳定的均衡分布;在 κ 、 δ_0 较大时, x 、 δ 呈周期振荡, x 比 δ 存在一个滞后时间,且随 κ 的加大,振幅会加大;当 κ 大到某一程度, x 、 δ 又会呈现为稳定分布,只是此时 x 、 δ 均取非零值,且一正一负,符号相反。这些结果均与我们对系统的实际了解是一致的。

进一步,以联邦德国 1955 ~ 1980 年的发展为例,根据各时期的经济政

策不同,在不同阶段选取不同的参量值,经计算机求解所得到的结果与实际数据符合得很好(见图 7.5.1)。

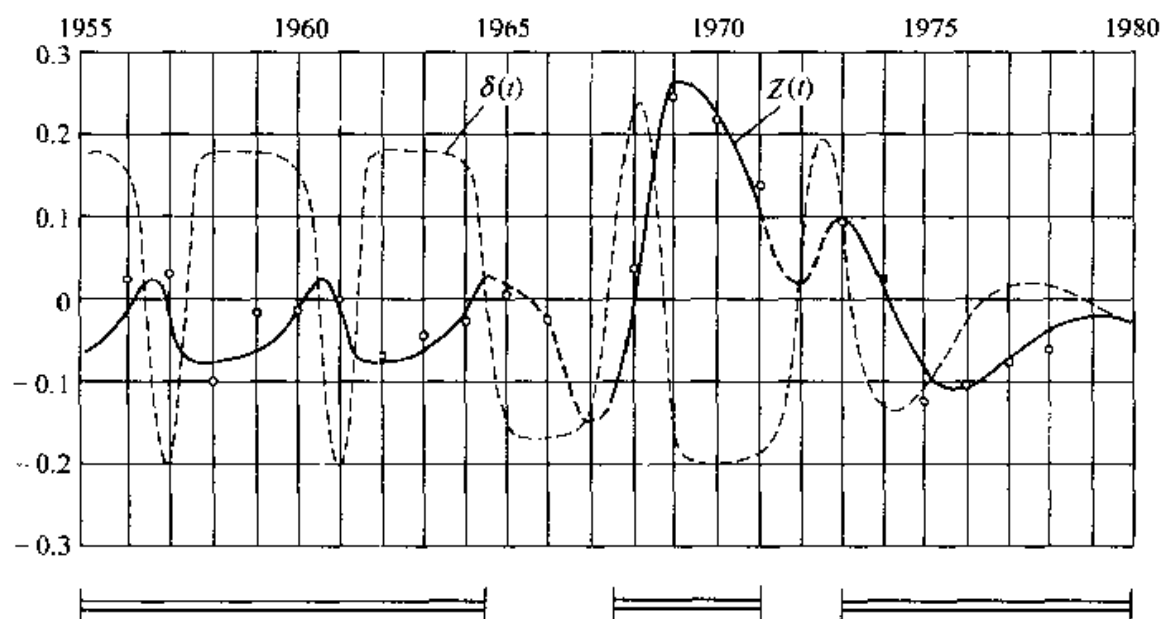


图 7.5.1 结构指数 $Z(t)$ (实线), 互变因子 $\delta(t)$ (虚线) 随时间发展的径迹
与实际投资量(圆圈)的比较

具体做法是,按实际演化情况将整个计算过程分成三个阶段,对所得结果,按阶段定性分析德国经济的发展状况。第一阶段从 50 年代中期到 60 年代中期,联邦德国经济发展与理论上存在的极限环是一致的,第二次世界大战后,由于经济实力不足,在经历较短的开发型投资之后便转入合理型投资,合理型投资壮大了经济实力,然后又缓慢转向开发型投资为主的时期。第二阶段 60 年代后期,联邦德国政府建立了紧密联合体,经济上采用席勒(Schiller)的主张,这相当于一个较高的 δ_0 参量。在席勒以后即开始第三个时期,这时不得不把 δ_0 调整为负值,以便把经济调整到一个较为稳定的周期上。

从以上情况可以看出,所介绍的方法基本上达到了可以了解经济发展特点的目的,从而可以分析原因找出其中规律。

7.5.3 启发

在人口模型中,我们的计算结果与实际情况相当吻合,由此我们看到可以利用简单巨系统理论来研究中国人口的演化。对一个省、市内的人口变化及迁移,也可以利用上述模型同样进行讨论。人口系统是一开放系统,利

用经济与人口之间关系,列出系统的演化方程就可以预测人口的演化。一般认为中国是一个计划经济的国家,各方面的发展都有非常强的限制,利用简单巨系统理论讨论问题有一定困难,但我们只要适当改变参数及变量的形式。比如采用计划招工指标作为工作岗位数的发展潜力,把直接的控制作为容许系统发展潜力的一种限制,让系统在这一潜力下自由的发展,就可以利用简单巨系统理论进行讨论。这个工作的成功大大开拓了简单巨系统理论的应用范围,使我们对一些表面看起来是由外界控制系统的运动,比如讨论计划经济类型国家的发展,也可以采用简单巨系统理论的方式进行讨论。

上述工作仅仅是关于人口空间分布演化特点的初步探讨,所得结果虽然与实际比较符合,但还存在很多问题,还有很多工作需进一步研究。

对经济问题的分析研究比较简单初步,仅仅停留在将它作为一个系统,从系统科学中简单巨系统理论的角度研究它的演化规律,显然,这还是不够的。因为经济系统实际上是一个开放的复杂巨系统,需要用从定性到定量的综合集成方法来进行讨论,这在后面具体进行介绍。另外,近年来我们从经济理论本身出发,探讨经济现象背后所隐藏的规律,目前主要在宏观经济层次,研究商品市场、劳动力市场、金融市场三者之间的关系,选择描写经济行为主体、经济关系的变量,建立其演化机制。关于这部分内容,在一定意义上属于数理经济学的内容,我们这里也不再讨论。

第 8 章 复杂适应系统理论及其应用

复杂适应系统(Complex Adaptive System,简称 CAS)理论的提出对于人们认识、理解、控制、管理复杂系统提供了新的思路。CAS 理论包括微观和宏观两个方面。在微观方面,CAS 理论的最基本的概念是具有适应能力的、主动的个体,简称主体。这种主体在与环境的交互作用中遵循一般的刺激-反应模型,所谓适应能力表现在它能够根据行为的效果修改自己的行为规则,以便更好地在客观环境中生存。在宏观方面,由这样的主体组成的系统,将在主体之间以及主体与环境的相互作用中发展,表现出宏观系统中的分化、涌现等种种复杂的演化过程。

CAS 理论虽然提出不久,但是由于其思想新颖和富有启发,它已经在许多领域得到了应用。在经济、生物、生态与环境以及其他一些社会科学与自然科学中,CAS 理论的概念与方法都得到了不同程度的应用和验证。CAS 理论对于人们的思维方法具有不少启发,它的影响正在逐步传播到各个领域,推动着人们对于复杂系统的行为规律进行进一步的深入研究。

8.1 CAS 理论的基本观点和概念

8.1.1 圣菲研究所和 CAS 理论的产生

复杂适应系统理论是霍兰于 1994 年,在圣菲研究所成立 10 周年时正式提出的。在圣菲研究所的乌拉姆系列讲座的首次报告会上,霍兰以“复杂创造简单”为题作了演讲。^[1]在这个报告中,他在多年研究复杂系统的成果的基础上,提出了关于复杂适应系统的比较完整的理论。作为 CAS 理论的产生背景,有必要对圣菲研究所作一简要的介绍。

CAS 理论的诞生地——圣菲研究所成立于 1984 年。它是一个独立的非赢利的研究所,靠申请各种基金来支持跨学科的研究工作。不久前,它被评为全美国最优秀的 5 个研究所之一,与具有上百年历史的贝尔实验室等并列在一起。

圣菲研究所的发起者和第一任所长考恩(George Cowan)是一位具有广阔视野和远见卓识的科学家。他曾长期担任洛斯阿拉莫斯的技术与组织领

导工作,具有丰富的理论知识和实践经验。当他退休的时候,多年的思考促使他萌发了这样一个创意:建立一个冲破学科界限的,研究各学科共同关心的,“人类究竟是如何认识和处理复杂性的”这个难题。这个想法的出现不是偶然的。考恩在几十年的科学生涯中,深深体会到近代科学中普遍存在的、片面强调还原论思想的弊病,以及由此而来的种种问题,如学科分隔造成的隔阂,综合的、整体的观念的缺乏,只见树木不见森林的短视和偏见,在丰富多彩的现实面前的僵化和无能。他认为,这些弊病不仅阻碍了科学的发展,而且往往是人类面临的许多现实问题难以得到有效解决的原因所在。因此,他利用自己多年工作中的广泛联系,把这个想法广为宣传。

在许多著名科学家的支持下,第一次研讨会于1984年,在美国新墨西哥州的首府圣菲市举行。这次会议以经济为主题,参加者不但有以诺贝尔经济学奖得主阿罗为首的许多经济学家,而且有许多物理学家,包括诺贝尔物理学奖得主盖尔曼和安德森。这次成功的交流使与会者十分兴奋,并且一致同意按此方向走下去。这就是圣菲研究所的由来。

以复杂性为研究的中心议题,是圣菲研究所的一大特色。在80年代中期,虽然已有不少学者提出并开始研究复杂性,但是还没有专门的机构从事这方面的工作。其主要原因之一是近代科学长期形成的学科分隔的局面,阻碍了科学家们的相互了解和交流。所谓隔行如隔山的情况,越来越成为科学进步的障碍。资金分配,成果认定以至学术圈子的划定,都使得跨学科的研究工作举步维艰。一种和谐的氛围,一个不受各种传统体制束缚的交流场所,一套鼓励创新的运行机制,成为许多希望科学进步的学者所追求的理想。圣菲研究所的出现使人们见到了希望。

圣菲研究所很快就吸引了一大批富有创新精神的,勇于探索这个新开辟的领域的科学家。他们来自许多不同的传统学科。如经济学家阿瑟(W. Brian Arthur),他在经济学界首先研究了现代经济的重要特征——收益递增现象。计算机科学家霍兰,他是遗传算法(genetic algorithm)的首创者,本章的讨论议题CAS理论主要就是由他提出的,还有以研究“人工生命”闻名的兰顿,从医学领域来的考夫曼,复杂性研究多种早期著作的作者卡斯蒂(J. Casti)等等。他们中既有德高望重的诺贝尔奖金得主(如阿罗,盖尔曼,安德森),也有初出茅庐、血气方刚的青年学者(例如当时还正在攻读博士学位的兰顿)。在圣菲,年龄、专业、地位都已不再构成交流的障碍,所有人都为了一门新的学科而到这里来。这里不授学位,更没有终身职位,但是却具有如

此巨大的吸引力。到 80 年代末期,圣菲研究所已经成为复杂性研究的众所周知的中心。²

进入 90 年代以来,圣菲研究所的工作进一步深入。以下几件事情具有特别重要的意义。

(1) 圣菲研究所从 1994 年开始举办乌拉姆讲座。这是一个一年一度的讲座,用以展示复杂性研究的最新成果。

(2) 公用的、为复杂系统建立模型而设计的软件平台 SWARM 的建立。计算机在圣菲研究所的工作中发挥着十分重要的作用。许多想法需要在计算机上进行验证,同时,计算机模拟又往往能提供有益的启发。正像有的专家指出的:“计算机是系统科学的实验室。”圣菲研究所针对各种课题的共同需求,开发了一个名为 SWARM 的软件平台,为各种模拟工作提供了方便易用的手段和环境。作为共同研究的基础,这个软件平台已经为圣菲研究所内外的许多研究项目所利用。据圣菲研究所的网站介绍,世界上已有几十个大学与研究所安装了 SWARM 平台。由于它的源程序是公开的,各国研究人员都可以对它进行修改与扩充,从而使它的内容得到不断丰富和发展。关于 SWARM,本章后面还将专门介绍。

(3) 圣菲研究所非常重视人才培养,它把扩散和普及系统科学的思想作为自己最重要的任务之一,尤其是向下一代科学家的宣传与普及。它的夏季学校是一项很有特色的活动,至今已经举办了十余期。这种学校每年暑假举办一次,为期四周,讲课的教授都是系统科学方面的著名专家,而对象则是研究生以至本科生。他们的目标很明确:面向 21 世纪的新一代科学家。

(4) 圣菲研究所还出版了许多出版物,除了已出版的几十种专著之外,它还出版杂志《复杂性》(Complexity)。为了加快交流,圣菲研究所还编发内部交流的工作论文,每年有 100 篇左右,不但印成单份散发,而且放在网站上。这一措施大大加速了该领域的交流。

总之,圣菲研究所十分重视理论与实际的结合。从性质上来说,圣菲研究所是以基础理论研究为主的,非赢利研究机构,各种基金会的支持也往往不与直接的经济效益挂钩。但事实上,圣菲研究所的研究课题几乎都有十分现实的背景,与重要的现实问题相联系。人数最多的课题组是经济课题组,这显然是与近 20 年来世界经济体系的深刻变革相联系的。此外,关于免疫系统的研究,关于生态与环境系统的研究,关于社会变迁的研究,关

于生命起源的研究,关于人的早期意识和语言的研究,也都和当今人类的许多迫切的现实问题相联系。

CAS 理论就是在这样一个环境中孕育和诞生的。

8.1.2 CAS 理论的核心思想——适应性造就复杂性

复杂适应系统理论的提出,是从对系统演化规律的思考引起的。复杂性研究的一个重要的方面,是对于复杂性的产生机制的研究。CAS 理论就是对于这个问题的一种回答。简单地说,其基本思想可以用一句话概括:“适应性造就复杂性。”当然,这是产生复杂性的机制之一,而不是复杂性的唯一来源。CAS 理论完全不排除还可能会有其他的产生复杂性的机制与渠道。然而,大量事实表明,由适应性产生的复杂性,即所谓复杂适应系统确实是一大类十分重要的、非常常见的复杂系统。它从一个侧面概括了生物、生态、经济、社会等一大批重要系统的共同特点。关于复杂适应系统的理论,无疑是现代系统科学的一个富有启发性的、值得重视的领域。

霍兰在《隐秩序》一书的序言中写道:

本书讨论的中心议题,是近来备受关注的—个领域:复杂性……在写这本书的过程中,我把重点放在复杂性的—个侧面——围绕“适应性”的复杂性上,这一领域现在被称为“复杂适应系统”……我认为,由适应性产生的复杂性极大地阻碍了我们去解决当今世界存在的一些重大问题。

作为复杂系统中的重要的一类,复杂适应系统的建模和研究目前已经成为—个热点。

CAS 理论的基本思想可以概述如下:我们把系统中的成员称为具有适应性的主体(adaptive agent),简称为主体。所谓具有适应性,就是指它能够与环境以及其他主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中,不断地“学习”或“积累经验”,并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个宏观系统的演变或进化,包括新层次的产生,分化和多样性的出现,新的、聚合而成的、更大的主体的出现等等,都是在这个基础上逐步派生出来的。

按照某些传统的看法,复杂性主要来自系统的外部。例如,结构的复杂性,系统内部的分工或分化,常常被归之于外部力量(如神)的创造。系统行为之复杂和不可预测,也总是归之于外部的随机性的干扰。这种想法可以说是由来已久。近几百年发展起来的近代科学,回答了以前的人类所不知

道的许多问题,然而,对于复杂性究竟是从何而来的这个基本问题,却似乎没有什么进步。而且,由于对热力学第二定律的片面理解,认为任何事物的发展都按照这样一条道路:从不对称到对称,从有结构到无结构,从有差别到无差别,一句话,从复杂到简单。显然,这种认识与丰富多彩的大千世界是完全不相容的。然而,囿于还原论的束缚,人们对于这种矛盾视而不见,仍然不得不把复杂性的来源归之于神秘的、外来的力量。

现代系统科学的发展打破了这种形而上学的看法,特别是对于自组织现象的研究,引导人们从系统内部寻找复杂性的来源。然而,最初研究的自组织现象,在某种意义上还是比较简单的。这些系统中的元素(或个体)还是被动的、“死的”,并没有自身的目的和主动性。这就使得这一阶段的理论与方法,难以有效地应用到生物、生态、经济、社会等领域。

CAS 理论正是在这方面向前迈进了一大步,即把系统的成员看作是具有自身目的与主动性的、积极的“活的”主体。更重要的是,CAS 理论认为,正是这种主动性以及它与环境反复的、相互的作用,才是系统发展和进化的基本动因。宏观的变化和个体分化都可以从个体的行为规律中找到根源。霍兰把个体与环境之间这种主动的、反复的交互作用用“适应性”一词加以概括。这就是 CAS 理论的基本思想——适应性造就复杂性。

8.1.3 CAS 理论的基本概念

系统中的个体一般称为元素、部分或子系统。复杂适应系统理论采用了 adaptive agent(具有适应能力的个体)这个词,是为了强调它的主动性,强调它具有自己的目标、内部结构和生存动力。因此,为了行文方便,我们在下文中简称其为主体,不再每次讲具有适应能力的个体。agent 这个词本来是经济学中的用语,表示代理人或代理商的意思。霍兰借用这个词,明显地表示:经济系统是他建立 CAS 理论时心目中的主要背景之一。

但是单独用主体这个概念,是无法完全表达出 CAS 理论的丰富内容的。所以,围绕主体这个最核心的概念,霍兰进一步提出了研究适应和演化过程中特别要注意的 7 个有关概念:聚集,非线性,流,多样性,标识,内部模型,积木。

在这 7 个概念中,前 4 个是个体的某种特性,它们将在适应和进化中发挥作用,而后 3 个则是个体与环境进行交流时的机制。

8.1.3.1 特性

(1) 聚集(aggregation):主要用于个体通过“粘着”(adhesion)形成较大的

所谓的多主体的聚集体(aggregation agent)。由于个体具有这样的属性,它们可以在一定条件下,在双方彼此接受时,组成一个新的个体——聚集体,在系统中像一个单独的个体那样行动。

在复杂系统的演变过程中,较小的、较低层次的个体通过某种特定的方式结合起来,形成较大的、较高层次的个体,这是一个十分重要的关键步骤。这往往是宏观性态发生变化的转折点。然而,对于这个步骤,以往的、基于还原论的思想方法是很难加以说明和理解的。

事实上,聚集现象在许多系统中都存在。例如,在生物界中,共生现象越来越多地得到重视和研究。近年来,人们发现,在一些高等生物体内存在着许多独立的低等生物。这些低等生物完全是独立的个体,按照自身的规律生存和发展。它把高等生物体内的条件作为自己的生存环境,进行着物质、能量与信息的流通与处理。如人体细胞中的线粒体。一方面,它们是完整意义下的、独立自主的生物;另一方面,在长期演化过程的作用下,它们必须也只能在人体内的这种环境中生存。如果按传统意义下的系统元素去理解,则这两方面的矛盾将是无法解决的。因为,在传统的思维模式中,部分或元素是“死的”、被动的、没有自己的目的与意志的;如果它有自己的目的、意志、主动性,那就只会对系统起瓦解作用。这就把上述的两个方面绝对地、不可调和地对立起来、割裂开来。生物界的事实告诉我们,这种思维方式是不符合客观实际的。托马斯(L. Thomas)以许多生动的共生体的事例说明了这方面的情况^{3,4,5}。如果我们把目光转向社会生活,那么这种例证又可以增加许多。个人与社会,雇员与企业,以及企业集团的形成等,都反映了不同层次的主体之间的有效的协调和共生。

聚集这个概念正是归纳与反映了复杂系统在这方面的行为特征。由于承认了个体的主动作用,由于克服了在整体与局部之间,非此即彼的绝对的对立,CAS理论提供了理解与描述上述现象的新视角。聚集不是简单的合并,也不是消灭个体的吞并,而是新的类型的、更高层次上的个体的出现;原来的个体不仅没有消失,而是在新的更适宜自己生存的环境中得到了发展。这就是后面将要讲到的“粘着”的意义。

聚集的概念对于层次的理解也提供了有益的启发。层次之间是有质的差别的。把层次之间的差别仅仅理解为量的差别,是一种常见的误解。然而,层次之间的质的差别究竟是怎样涌现出来的。在这里,聚集也起了关键的作用。

(2) 非线性(nonlinearity):指个体以及它们的属性在发生变化时,并非遵从简单的线性关系。特别是在和系统或环境的反复的交互作用中,这一点更为明显。近代科学所以在许多方面遇到了困难,重要原因之一就是它把自己的眼界局限于线性关系的狭窄范围内,从而无法描述和理解丰富多彩的变化和发展。CAS 理论认为个体之间相互影响不是简单的、被动的、单向的因果关系,而是主动的“适应”关系。以往的“历史”会留下痕迹,以往的“经验”会影响将来的行为。在这种情况下,线性的、简单的、直线式的因果链已经不复存在,实际的情况往往是各种反馈作用(包括负反馈和正反馈)交互影响的、互相缠绕的复杂关系。正因为这样,复杂系统的行为才会如此难以预测;也正因为这样,复杂系统才会经历曲折的进化过程,呈现出丰富多彩的性质和状态。

CAS 理论把非线性的产生归之于内因,归之于个体的主动性和适应能力。这就进一步把非线性理解为系统行为的必然的、内在的要素,从而大大丰富和加深了对于非线性的理解。正因为如此,霍兰在提出具有适应性的主体这一概念时,特别强调其行为的非线性特征,并且认为这是复杂性产生的内在根源。

(3) 流(flow):在个体与环境之间,以及个体相互之间存在着物质流、能量流和信息流。这些流的渠道是否通畅,周转迅速到什么程度,都直接影响系统的演化过程。

自古以来人们就认识到各种流的重要性,并且把这些流的顺畅当作系统正常运行的基本条件。例如,中医所谓的“气”、“血”,就是典型。通则健康发展,不通则生百病。又如,信息系统工程对信息流的分析和设计,也是从流的分析入手,去认识和理解复杂系统。越复杂的系统,其中的各种交换(物质,能量,信息)就越频繁,各种流也就越错综复杂。所以,复杂适应系统的理论把对于各种流的分析,当作一个值得注意的重要问题。

(4) 多样性(diversity):在适应过程中,由于种种原因,个体之间的差别会发展与扩大,最终形成分化,这是 CAS 的一个显著特点。

多样性的概念目前已经在许多领域中得到了广泛的使用,应该说,这是一个很大的进步。长期以来,人们误以为世界的统一性就意味着单一性。经过了 20 世纪科学的多方探索,今天我们已经开始承认和认真地面对多样性了。生物的多样性已经成为国际论坛上的热门话题,已经以国际公约的形式表达了人们的共识。文化的多样性也已经得到了越来越多的认同。系

统复杂性的重要思想之一就是个体之间的差别,个体类型的多样性。当前的复杂性研究着眼于个体类型多种多样的情况,而其中的CAS理论则进一步研究这种多样性是怎样产生的,即分化的过程。霍兰指出,正是相互作用和不断适应的过程,造成了个体向不同的方面发展变化,从而形成了个体类型的多样性。而从整个系统来看,这事实上是一种分工。如果和前面讲到的聚集结合起来看,这就是系统从宏观尺度上看到的“结构”的“涌现”,即所谓“自组织现象”的出现。

8.1.3.2 机制

(1) 标识(tagging):为了相互识别和选择,个体的标识在个体与环境的相互作用中是非常重要的,因而无论在建模中,还是实际系统中,标识的功能与效率是必须认真考虑的因素。

标识的作用主要在于实现信息的交流。流的概念包括物质流和信息流,起关键作用的是信息流。在以往的系统研究中,信息和信息交流的作用没有得到足够的重视。这是对于复杂系统行为的研究难以深入的原因之一。CAS理论在这方面的发展就在于把信息的交流和处理作为影响系统进化过程的重要因素加以考虑。强调流和标识就为把信息因素引入系统研究创造了条件。

谈到信息的作用,现在大家都承认,它是人类社会经济生活中的基本要素之一。然而,一般地说,在复杂系统中,它是怎样发挥作用的呢?对此一直没有深入的研究。以前的系统研究中缺乏对于信息流的具体机制的思考。标识的意义就在于提出了个体在环境中搜索和接收信息的具体实现方法。在下面将介绍的基本的刺激-反应模型中,个体的标识将在信息的传递中起关键作用。

众所周知,在经济学中,由于承认了信息的不平衡,深入研究了信息和信息流的作用,使得经济学的研究方法与深度有了突破性的进步,产生了新的经济学的思想——信息经济学。可以预见,在复杂系统的研究中,对信息和信息流的深入研究,必将对科学的发展产生积极的作用,开辟新的思路。

(2) 内部模型(internal models):这一点表明了层次的概念。每个个体都是有复杂的内部机制的。对于整个系统来说,这就统称为内部模型。

(3) 积木(building blocks,亦译构件):复杂系统常常是在一些相对简单的构件的基础上,通过改变它们的组合方式而形成的。因此,事实上的复杂性往往不在于构件的多少和大小,而在于原有积木的重新组合。

内部模型和积木的作用在于加强层次的概念。客观世界的多样性不仅表现在同一层次中个体类型的多种多样,还表现在层次之间的差别和多样性。当我们跨越层次的时候,就会有新的规律与特征出现。这样一来,我们需要深入考虑的就是这样一些问题:怎样合理地区分层次,不同层次的规律之间怎样相互联系和相互转化。内部模型和积木的概念就是用来回答这些问题的。概括地说,它们提供了这样一条思路,把下一层次的内容和规律,作为内部模型“封装”起来,作为一个整体参与上一层次的相互作用,暂时“忽略”或“搁置”其内部细节,而把注意力集中于这个积木和其他积木之间的相互作用和相互影响上,因为在上一层次中,这种相互作用和相互影响是关键性的,起决定性作用的主导因素。了解计算机科学技术的读者不难看出,这种思想与计算机领域中的模块化技术以及近年来广为传播的“面向对象的方法”是完全一致的。

霍兰在他的报告中,用了大量例子解释这些概念在各种领域中的用处。通过这 7 个方面的表述,主体的特点就充分表现出来了:它是多层次的、和外界不断交互作用的、不断发展和演化的、活生生的个体。这就是 CAS 理论思想的独特之处。

8.1.4 CAS 理论的主要特点

CAS 理论的核心思想——“适应性造就复杂性”,具有十分重要的认识论意义。可以说,这是人们在系统运动和演化规律的认识方面的一个飞跃。这一点可以从以下 4 个方面来加以说明。

(1) 主体是主动的、活的实体。这点是 CAS 和其他建模方法的关键区别。这个特点使得它能够有效地应用于经济、社会、生态等其他方法难于应用的复杂系统。

从元素到主体,并不是一个简单的名称的改变。对于系统的组成部分,以前一般称为元素、单元、部件或子系统。作为与系统、全局、整体相对而言的概念,元素、单元、部件,都是作为一个被动的、局部的概念而提出的。主体的概念则把个体的主动性提高到了系统进化的基本动因的位置,从而成为研究与考察宏观演化现象的出发点。这一思路具有十分明显的突破性。复杂性正是在个体与其他个体之间主动交往,相互作用的过程中形成和产生的。在这里既没有脱离整体、脱离环境的个体,也没有抽象的,凌驾于“个体”之上的整体。个体的主动性是这里的关键。个体主动的程度,决定了整个系统行为的复杂性的程度。

这里所说的主动性或适应性,是一个十分广泛的、抽象的概念。它并不一定就是生物学意义上的“活”的意思。只要是个体能够在与其他个体的交互中,表现出随着得到的信息不同,而对自身的结构和行为方式进行不同的变更,就可以认为它具有主动性或适应性。适应的目的是生存或发展。这样,关于“目的”的问题,也可以在这里得到比较合理的理解和解释,而不至于走到神学那里去。

(2) 个体与环境(包括个体之间)的相互影响和相互作用,是系统演变和进化的主要动力。以往的建模方法往往把个体本身的内部属性放在主要位置,而没有把个体之间,以及个体与环境之间的相互作用给予足够的重视。这个特点使得 CAS 方法能够运用于个体本身属性极不相同,但是相互关系却有许多共同点的不同领域。

这种相互作用的观点是很有启发的。我们说个体是整体的基础,并非指孤立的、单独的个体是整体的基础。如果是这样,我们就又回到还原论的观点去了。个体的相互作用才是整体的基础。当我们说“整体大于部分之和”的时候,指的正是这种相互作用带来的“增值”。复杂系统的丰富多彩行为正是来源于这种“增值”。这种相互作用越强,系统的进化过程就越加复杂多变。

另外,这里的相互作用主要是指个体与其他个体之间的相互作用。强调这点有两方面的意义。首先,这里并没有一个凌驾于所有个体之上的整体的“代表”。对于每一个个体而言,整体的作用正是通过其他个体表现出来的。同样,每一个个体对于别的个体也起着“环境”的作用,或在不太确切的意义上讲,起着“代表”整体的作用,因为严格地说,每一个个体都不能独自代表全局。这就较好地说明了整体与个体之间的辩证统一关系。另一方面,在这些相互作用中,个体之间的关系存在着从“平等”到“分化”的发展过程。这就是说,在系统演化的早期,个体的潜力,或者说潜在的能力是差不多的。原则上,每一个个体都有多种发展前途的可能性。在相互作用的过程中,由于各种因素(包括随机因素)的作用,有的个体向这个方向发展,有的个体向那个方向发展。在发展中产生了结构,对称性被打破。这样,整个系统就变得比较复杂了。这就是从简单到复杂的演化。也就是说,相互作用是“可记忆的”,它表现为进化过程中每个个体的结构和行为方式的变化,环境的影响以不同的方式“存储”在个体内部。

因此,CAS 理论发展了系统科学中历来强调的相互作用的思想,使得进

化的观念具体化了。这里把适应性的思想,从生物学中引入了系统研究的领域。显然,这对于系统科学的思想方法是非常有用的充实和扩展,进一步丰富了系统思想的内容。

(3) 把宏观和微观有机地联系起来。它通过主体和环境的相互作用,使得个体的变化成为整个系统的变化的基础,统一地加以考察。

极端的还原论观点把宏观现象的原因简单地归结为微观,否认从微观到宏观存在着质的增加。另一种比较普遍的观念是:把统计方法当作从微观向宏观跨越的唯一途径或唯一手段。应当承认,基于概率论的统计方法确实是从微观到宏观的重要桥梁之一。宏观系统的某些属性可以理解为微观个体的某些属性的统计量,如气体温度之于分子的动能,总体国民教育素质之于每个社会成员的教育程度。这显然是重要的,因为它正确地反映了微观与宏观关系的一个方面。然而,问题在于,这是不是反映宏观和微观关系的唯一方法?曾有人做过这样的计算:如果地球上的有机物只是由于按照统计规律的偶然结合而产生的话,那么,从地球诞生到今天,连第一个蛋白质分子都还没有产生!显然,除了统计规律之外,一定还存在着其他的机制或渠道,它们同样也建立起微观与宏观之间的联系。CAS 理论在这方面给我们提供了一条新的思路。

如果个体没有主动性(比如气体中的分子),那么,它们的运动和相互关系的确只要用统计方法加以处理就行了。支配这样的系统的,确实主要就是统计规律。然而,如果个体是“活的”,有主动性和适应性,以前的经历会“固化”到它的内部。那么,它的运动和变化,就不再是一般的统计方法所能描述的。例如前面讲到的分化过程,显然就不是只靠统计方法所能加以说明的。

所以,在微观和宏观的相互关系问题上,CAS 理论提供了区别于单纯的统计方法的新的理解。如果把这种想法加以推广,把宏观和微观看作是相对的层次的话,那么,它为我们认识、理解、跨越层次提供了十分有益的思路。

(4) 引进了随机因素的作用,使它具有更强的描述和表达能力。

考虑随机因素并不是 CAS 理论所独有的特征。然而 CAS 理论处理随机因素的方法是很特别的。简单地说,它从生物界的许多现象中吸取了有益的启示,其集中表现为遗传算法。关于遗传算法,本书第 4 章已经进行了比较详细的讨论,这里只是就其特色略加说明。

常见的考虑随机因素的方法是引入随机变量,即在变化的某一环节中引入外来的随机因素,按照一定的分布影响演变的过程。这种方式中,随机因素的作用是“暂时的”,只在一个特定步骤上起作用。它只是通过其对系统状态的某些指标产生定量的影响。在这种影响过后,事物只是在状态参数上有所变化,而运作的规律、内部的机制并没有质的变化。形象地说,系统不会因此而“演化”。显然,这正是前面所说的,把系统的元素看作“死的”对象所导致的局限性的表现。

而遗传算法的基本思想则在于:随机因素的影响不仅影响状态,而且影响组织结构和行为方式。“活的”具有主动性的个体会接受教训,总结经验,并且以某种方式把“经历”记住,使之“固化”在自己以后的行为方式中。正因为这样,CAS理论提供了模拟生物、生态、经济、社会等复杂系统的巨大潜力,明显地超越了以往的一般的随机方法。

正是由于以上这些特点,CAS理论具有了与其他方法不同的、更具特色的、新的功能和特点。

8.2 个体怎样适应和学习

在这些概念的基础上,霍兰通过3个步骤,建立了描述他所定义的具有主动性的主体的基本行为模型,即对于个体是怎样适应和学习的理解和描述。

这3步是:(1) 建立执行系统的模型;(2) 确立信用分派的机制;(3) 提供规则发现的手段。下面我们分别说明这3步的具体思路。

8.2.1 刺激-反应模型

这一步的目标是要用一种统一的方式,来表达各种系统中的主体的最基本的行为模式。出发点是基本的刺激-反应模型。例如,一只青蛙看到小虫飞过,便伸出舌头去捕食。这里的刺激就是“小物体靠近”,而反应则是“伸出舌头”。类似地,对于“大物体靠近”的反应则可能是“逃避”。按照现代信息处理的一般思路,这里的规则,包括条件和反应,都可以表示为字符串,如在第一位用0表示没有物体靠近,而用1表示有物体靠近,在第二位分别用0和1表示小物体和大物体。这样一来,上述第一个刺激就可以用“10”表示,而第二个刺激则表示为“11”。同样,反应也可以通过编号和二进制,表示为字符串。把两个字符串连起来,前半段是条件,后半段是反应。用遗传算法的说法,这就是“染色体”。如图8.2.1所示。每个主体内部都存储着许多条这样的规则,规则越多越细,个体的行为就越精巧。

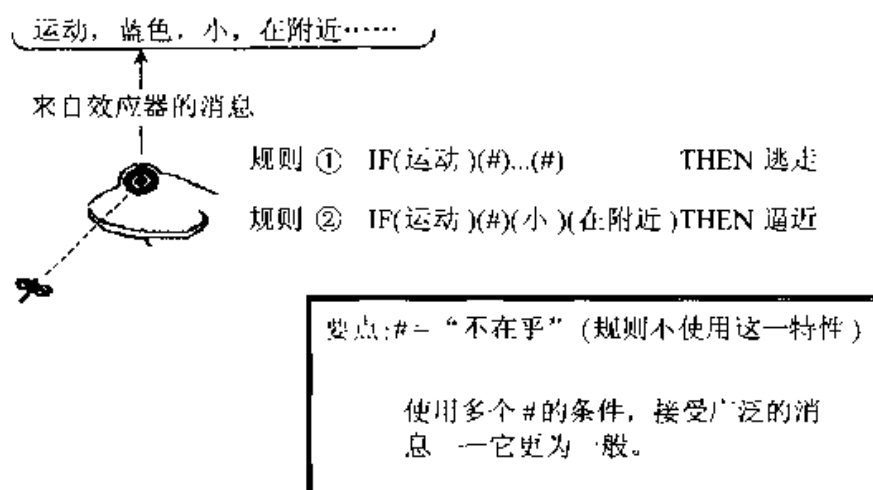


图 8.2.1 染色体的表示方法

这里涉及以下几个概念:

输入——环境(包括其他个体)的刺激

输出——个体的反应(一般是动作)

规则——对什么样的刺激,做出怎样的反应的规则

探测器——接受刺激的器官

效应器——给出反应的器官

它们之间的关系及消息流如图 8.2.2 所示。

按一般的想法,所有的规则都应当互相一致,既不重复(每一个刺激只有一种确定的反应)也不遗漏(每一个刺激必然有唯一的一条规则与之相对应),否则就是有矛盾,系统就会被认为是处于错误的状态。如果这样看待,那就和一般的“IF...THEN...”没有什么差别了。

然而,正是在这里,CAS 理论引进了一个重要的思想。它认为,这种看法和要求不适用于复杂系统的建模,恰恰相反,应当把这些规则看作是有待于检验和认证的假设。进化的过程正是要提供多种多样的选择,因而需要有矛盾、冲突和不一致,而不是避免或消除它们。所以,这里的规则(或按遗传算法称为染色体)应当足够多而且有选择的余地,它们之间不但可以,而且需要有矛盾和不一致。当然,为了真正进行操作,需要在这些规则之间建立一种进行比较和选择,进而进行淘汰的机制,这将是下一步——信用分派的任务。

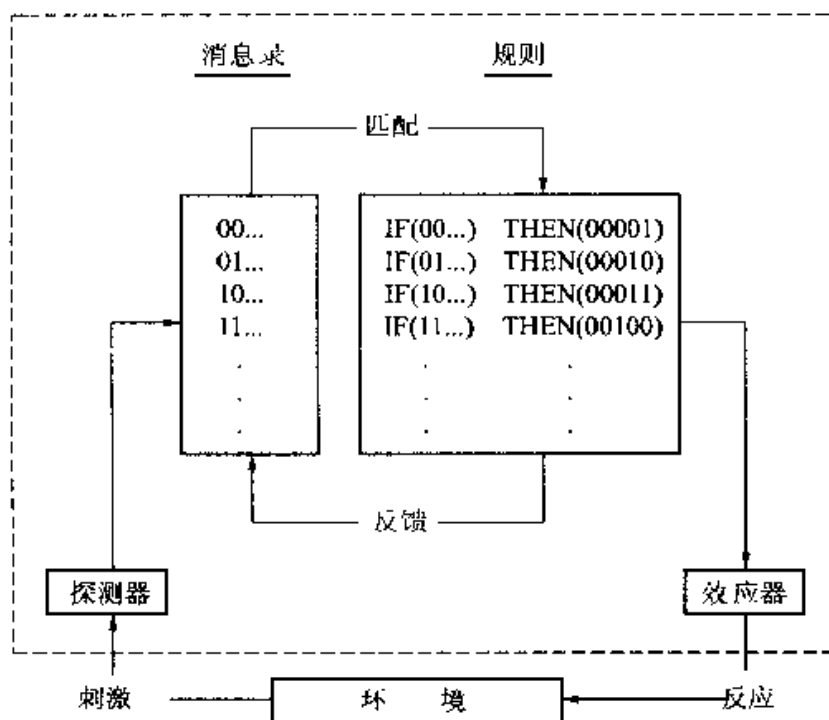


图 8.2.2 刺激-反应行为系统

执行系统说明了主体在某个时刻的能力。执行系统的三个主要部分是：一个探测器，一组 IF/THEN 规则和一个效应器。探测器代表了主体从环境中抽取信息的能力，IF/THEN 规则代表了处理这些信息的能力，而效应器则代表了它反作用于环境的能力。这三种元素都是抽象的，已经剔除了特定机制的细节，所以可应用于不同种类的主体。

仔细分析探测器的概念，我们就能更进一步理解在这样的建模过程中，丢失了什么、获得了什么。抗体使用的探测器依赖于局部的化学键的排列，而生物体的探测器显然与它们的感官相对应，商业公司的探测器的功能则通过它的各种部门来完成。在每种例子中，都有各自的有趣的问题，即从环境中抽取信息的特殊的机制。但是在这里，我们把这些问题的暂时放在一边，而把注意力集中在产生的信息——主体对之敏感的环境特性上。我们利用这样一个事实，任何这种信息皆可以用二进制串表示，此处叫做消息。这样一来，我们就得到了用统一的方式描述主体抽取环境信息的机制的能力。

对主体内部处理信息的能力，我们有着同样的考虑。具体机制是多种多样的，但我们把注意力集中在信息的处理上。把 IF/THEN 规则与消息结合起来，我们得到了如图 8.2.2 所示的表达方式：IF(在消息中有某类型的

消息)THEN(做出相应的反应)。这样一来,我们就已经舍弃了特定的主体处理信息所用的具体机制的细节。例如,在研究胚胎发育中基因开和闭的连续过程时,我们就暂时舍弃了关于阻抑和去阻抑等特殊机制的细节。但我们保留了事情发展阶段的描述,以及信息在每个阶段的反馈。总的来说,我们获得了这样一种能力,可以在计算机上描述系统进行信息处理的能力。由于很多规则同时起作用,我们获得了描述复杂适应系统分布式活动的一种自然方式。

8.2.2 适应度的确认和修改

为了对规则进行比较和选择,首先要假设的信用程度定量化,为此我们给每一条规则一个特定的数值,称为强度,或者按照遗传算法的名称,称之为适应度。每次需要使用规则的时候,系统按照一定的方法加以选择。选择的基本想法是:按照一定的概率选择,具有较大强度或适应度的规则有更多的机会被选用。在这个基本算法的基础上,还可以加入并行算法和缺省层次等思想,使得规则的选择更加灵活,更加符合现实的系统行为。

信用分派的本质是向系统提供评价和比较规则的机制。当每次应用规则之后,个体将根据应用的结果修改强度或适应度。这实际上就是“学习”或“经验积累”。

在遗传学、经济学和心理学的定量分析与研究中,为了解决这个问题,经常是根据要求,对感兴趣的对象赋予一定的数值。例如,对染色体赋予适应度,对货物赋予效用值,对行为赋予一定数量的奖赏。但是,问题是非常微妙的。考虑一个生物体的行为。一般地,进化的机制是建立在一定的内部分析器中的。专门的探测器随时记录着各种不同类型的资源(如食物、水等)的状态或数量。生物体的行为就是要保持这些“储备仓库”不要“空”,并且能不断增加。规则强度的增加或减少取决于储蓄仓库的状态变化。显然,现实的市场中和生物界的竞争现象,就是这种描述适应性主体竞争行为的信用确认技术的背景。

信用分派机制的意义在于,它提供了把定量研究与定性研究有机结合起来的途径。本来,所谓“好”和“坏”,“成功”和“失败”,“优势”和“劣势”都是定性的概念,它们虽然在适应过程中常常被使用,然而却带有很大的主观性和随意性。因此,在它们的基础上,进一步讨论“学习”、“适应”、“积累经验”就更困难了。信用分派机制则提供了实际的度量方法。这样建立起来的机制从根本上来讲是定量的,因为它以确切的数字为基础。然而,它又不是

一般意义下的、简单地试图用一个数或一组数来衡量复杂事物的定量方法,而是基于一个包含着不同的、以至相互矛盾的规则集合。这些规则之间的区别显然是定性的、质的差别。这里的结合点在于“实践”,即对于环境所做出的反应的结果,或者说就是与环境相互作用的过程,即适应过程。通过定量的“积累经验”的过程,实现定性的“规则筛选”的目标。

8.2.3 新规则的产生

经过与环境的对话与交流,已有的规则就能够得到不同的信用指数。在这个基础上,下一步的要点就是如何发现或形成新的规则,从而提高个体适应环境的能力。

这里的基本思想是,在经过检验后的较成功的规则的基础上,通过交换、突变(见图 8.2.3)等手段创造出新的规则来。需要注意的是,由于在这里是基于经验来进行新规则的创造,所以比纯粹根据概率去查找和检验一切可能性要快得多,效率高得多。这些我们将在后面的有关例子中看到。

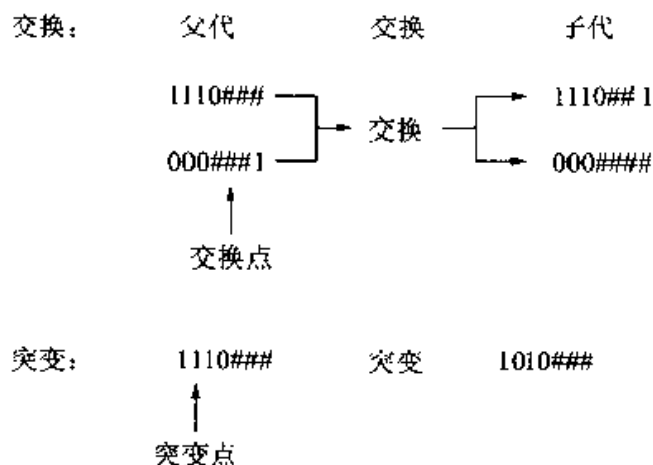


图 8.2.3 交换与突变

交换和突变使得我们可以进一步创造出新的规则。为了理解它们的作用,我们可以回顾一下在运筹学中所经常采取的方法,在状态空间或解空间中进行的搜索。为了寻找最优解,或者可行解,许多算法提供了各种各样的思路,但是由于空间规模太大,许多算法往往难以实际使用。显然,从理论上这些算法都是正确的,然而在许多情况下,完全靠蛮力去检验和寻找,实在无异于大海捞针。这里介绍的方法(主要是遗传算法)则开辟了另一条思路:从经验中积累,从已有的规则出发。让成功可能性比较高的规则产生出

新的规则,再让实际与环境交互的过程筛选出比较有效的规则和积木,进而产生更有效的规则。依赖已有的成果,考虑实际应用的结果,这就是这种新的思路的特点,也正是它具有更大潜力的原因所在。

规则发现,即合理假设的生成,集中在经过检验的积木的使用上。过去的经验会直接体现出来,而创新也有着广阔的空间。这种积木重新组合的特殊方法在遗传学上用得很多,但任何一个具有普遍性的过程都可以用这种方法抽象出来。用积木的思想,我们甚至可以描述神经生理学理论。

在神经生理学理论中,细胞集合就是几千个相互关联的能够自动保持回应的神经元集合。细胞集合的运行有点像通过普通标识耦合在一起的小规则簇。多个细胞集合的行为是并行的,通过大量的突触神经元之间的接触(一个神经元可能会有上万个突触)广泛地传播消息(脉冲)。细胞集合通过招募新兵(加入其他细胞集合的部分)和分化瓦解(分成作为后代的片段)竞争神经元。我们很容易把这个过程看成是经过检验的积木重组。此外,多个细胞集合可以集成为叫做相序列(phase sequences)的大结构。事实上,在各种不同类型的问题领域中,不难发现都有极其相似的现象。

由于标识在规则的结合和提供后续活动方面起着如此重要的作用,注意,它们也拥有积木,这一点很关键。标识,实际上就是出现在规则的条件和运作部分的模式。这样的话,它们的操作就与规则的其他部分一样了。已经确认的标识——在强规则中发现的那些——会育出相关的标识,提供新的结合、新的簇和新相互作用。标识总是试图通过缺省层次,向内部模型的框架加入新鲜血液(相关的事物),以此来丰富内部模型。

有了这些定义和相应的过程,我们就有了统一的方式,去描绘 CAS 中适应性主体的行为了。适应性主体统一描述的可能,给我们能够真正在一个公共框架中描绘所有的 CAS 带来了希望。不同 CAS 的交叉比较有了新的意义,因为可以用一种公共语言做到这一点。我们能够把在一个 CAS 中突出和明显的机制,转化到另一个机制可能模糊但却很重要的 CAS 上。搜索中,对于一般原理的比喻和其他的指导更为丰富了。搜索变得更为直接、更为有希望了。

要想明白这样做的结果,进行比较是有益的。比如把胚胎比喻为城市,它们是极为相似的东西。如果我们看看 4 个世纪前纽约的起源,并在时间上做些适当的调整,城市的发展和胚胎的生长确实很相似。两者都在生长和变化。两者都发展了内部的边界和子结构,拥有了用于通信和资源传输

的不断完善的基础设施。两者都适应内部和外部的变化,在小范围内保持关键的功能,因而维持了内聚力。并且,通过不断加强基础,两者都拥有大量的适应性主体——一方是各种各样的公司和个人,另一方是形形色色的生物细胞。

在微观层次上,复杂适应系统理论是基于遗传算法的。本书第4章对遗传算法已有介绍,这里不再讨论。

8.3 从个体到全局——回声模型

8.3.1 位置和资源

现在我们从微观转向宏观,在前面所定义的主体模型的基础上,建立整个系统的宏观模型,霍兰称之为回声模型(Echo model)。

从微观到宏观的过渡历来是一个难题。不只在系统科学中,而且在经济学中(微观经济学和宏观经济学),在生物与环境科学中(生物个体与生态系统),在社会科学中(心理学与社会学)都存在着这个问题。现在,我们在前面建立的适应性主体的模型的基础上,来建立由这样的个体组成的复杂系统的模型。

我们已经讲过,传统科学在这个问题上的偏颇主要表现在以下两个方面,一方面,往往忽视层次之间的质的差别,总是试图用一个固定的、统一的模式去套不同层次的问题,或者简单地把宏观的、系统的属性当作统计规律看待。另一方面,把两者完全割裂开,切断它们之间的有机联系,如在经济学中长期把微观经济学和宏观经济学截然分开,回避其间的矛盾和不一致。

我们仍然分三步走,首先定义资源和位置,然后提出一个基本模型,在此基础上补充一些更复杂的属性,形成最终的模型。

为了给主体一个进行活动的外部环境,我们定义两个概念:(1) 资源。资源的意义十分广泛,例如现实生活中的水井或泉水,它可以不断向主体提供所需要的某种物质或能量。在经济系统中,银行就起着提供资金的作用。(2) 位置(site)。我们可以用城市去理解它。它是一个可以容纳若干个体活动的“容器”,具有一定的环境条件与资源条件,例如“温度”、“服务水平”等。个体可以在位置之间移动和选择。各个位置之间还有“距离”等概念。这就像一般计算机模拟中的环境参数一样。

不难体会出这两个概念的背景——生物学和经济学。生物界的土地、水分、空气、食物、养料等等都是资源。在经济管理中,资金、原材料、能源、

人力、技术、信息等等也都是资源。然而,在 CAS 理论中,资源的含义要更广泛,更抽象。任何系统中,为了维持这些“活的”、有主动适应能力的主体的生存与发展,必定要消耗或使用某种资源。事实上,它们不仅是生存的条件,而且是生存质量的标志。资源太少,少到一定程度,主体就会“饿死”。而资源丰富到一定程度,主体就会“繁殖”,分出或产生出新的主体。此外,主体还具备加工资源的能力。它可以用几种不同的资源生产出新的资源,例如一个工厂用不同的原材料,再加上必要的人力资源,能够生产出某种产品。所有这些方面的性质,就是 CAS 理论所提出的资源概念的含义。显然,它的内涵是十分丰富的。

位置的概念也是从许多实际情况中抽象出来的。它可以是某个市场,某个城市(在经济领域),也可以是某个树林,某个湖泊(在环境和生物科学领域中)。对于系统中的个体来说,位置是它们活动的“场所”。不同的场所对于主体的生存和活动来说,提供了若干基础条件:资源的充裕程度,相邻的主体的数量与情况,以及发展的空间与余地等等。此外,主体的主动性还表现在它们可以在位置之间移动,即选择适合于自己生存的,更为适宜的位置,正像动物的迁移,人口的迁移等等。

这样一来,为了构筑宏观系统的模型,除了主体之外,又定义了资源和位置。这几个概念互相结合,就形成了下面说的回声模型。

8.3.2 回声模型的基本框架

在这个基本模型中,主体具有最简单的功能——寻找交换资源的其他主体,与其他主体进行资源交流,保存及加工资源。

为此,主体要有三个基本部分:

- (1) 进攻标识——用于主动与其他主体联系和接触。
- (2) 防御标识——用于其他主体与自己联系时决定应答与否。
- (3) 资源库——用于存储的加工资源。

这样,这个主体的基本情况就如图 8.3.1 所示。

它的功能包括:主动与其他主体接触,同时也对其他主体的接触进行应答,如果匹配成功则进行资源交流,在自己内部存储与加工资源,如果资源足够,则繁殖新的主体。

在此基础上,整个回声模型成为如下情况:整个系统包括若干个位置,每个位置中有若干个主体,主体之间进行交往,交流资源和信息。这就是最基本的回声模型。

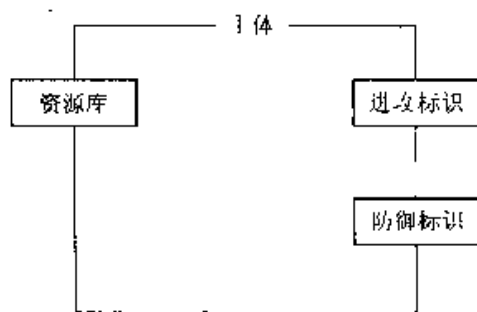


图 8.3.1 回声模型中主体的基本模型

需要说明的是,霍兰在构筑 CAS 理论时用的是归纳法。他是在大量研究具体案例的基础上,归纳出这些概念,而不是先给出一个定义,再进行演绎推理。许多丰富的含义是随着讨论的深入逐步展开的。这样做是否会降低这一理论的严格性和科学性呢?事实证明并非如此,恰恰是这种做法,使得这一理论具有丰富的内涵,给人以许多启示。而且作为一个刚刚开发的新领域,这种做法更加有利于开拓思路,引导思考,而避免过早地限制自己的思想,束缚自己的手脚。当然,这并不排斥在发展中逐步完善化、严格化。

8.3.3 回声模型的扩充

当然,这个基本的回声模型还过于简单,无法描述复杂的系统行为。霍兰在此基础上逐步增加各种功能,形成了扩展的回声模型。在《隐秩序》一书中,他进行了初步的扩充,先后加入了以下一些机制:

- (1) 增加“交换条件”机制,即在进攻标识与防御标识相符的条件下,还要加上某种交换条件的确认。比如,在采购原料时,并不只是有某种原料就行,还要考虑价格和质量。
- (2) 增加“资源转换”机制,即主体具备加工,利用和重组资源的能力。增加这一功能为主体的分工和专门化打下了基础。
- (3) 增加“粘着”机制,即若干主体通过建立固定的联系,成为一个多主体的聚合体在系统中一起活动。显然,它的来源是生物界的共生体以及经济活动中的企业集团。
- (4) 增加“选择交配”机制,即主体可以有选择地与其他主体结合,通过交换形成新的更强的主体。
- (5) 增加“条件复制”机制,即主体在资源充裕,条件适宜的情况下,复制增加自身的功能。

通过这一步步扩充,回声模型的表达和描述能力不断增强,从而具备了

描述和研究各种复杂系统的能力。不难看出,所有这些模型都有着明显的经济、生物、生态领域的背景和影响。所以,CAS 理论的研究并不是纯理论的思考的产物,而是在大量现实的复杂系统的考察与研究的基础上逐步抽象出来的。

当然,扩充到这种程度的回声模型仍然是十分简单的。这几步扩充还只是初步的。不难看出,生物、经济、社会等还有许多丰富多彩的现象和规律还没有加以描述和反映。这主要表现在以下几个方面:

- (1) 主体的功能单纯,结构单纯,类型单一。也就是说,它还不具备加工资源的能力;也没有分化;也没有选择性,包括对于环境和对于交换资源的对象。
- (2) 主体还不具备繁殖的功能,即只能根据其资源的状况确定能否生存下去,而不能进一步产生新的主体。
- (3) 信息的收集和处理能力还比较简单,进攻标识和防御标识都只具备基本的功能,还不能进行更为复杂的信息识别、分类等活动。
- (4) 资源的种类只是一种,因此也没有加工产生新资源,以及更为复杂的资源类别。

因此,这样的模型的描述能力还是十分有限的。从圣菲研究所提供的例子来看,只能描述一些极为简单的系统。然而,正如霍兰所说,CAS 是正在形成中的一种理论,它还需要更多地吸取各种复杂系统的进一步研究工作的启示,以期成为描述和模拟复杂系统的更有用的工具和手段。它为进一步的扩充与丰富提供了基础,这十分重要。在这方面还有极大的扩充余地,可做的事情还有很多。下面提出一些例子,提供一些进一步思考的线索。

传统的信息系统工程(或管理信息系统)的方法,即所谓生命周期法,至今还是该领域中应用最多的方法。但是在实际工作中,大家都感到它有许多弱点,其中很重要的一点就是难于适应环境的变化,开发出来的系统缺乏适应性。事实上,这并不是信息系统工程所独有的问题,而是近代发展起来的工程科学的普遍情况。项目越做越大,尾大不掉,难以适应情况的变化。正如人们所说的,复杂性随系统规律的扩大而按指数规律增长。一直到像“挑战者”号失事那样,酿成事故以至悲剧。究竟应当怎样建设大型系统(包括信息系统)呢? 因特网的成长为我们提供了一个成功的范例。没有人事先规划它,而是许多具有主动性的个体——站点(web site),按一定的标准

(TCP/IP)相互联系,“生长”出来这样一个全球性的庞大系统。显然,这正是CAS理论所描述的由适应性而产生的复杂系统。这不正是CAS理论的一个极好例证吗?如果就此深入研究,吸取经验,那就一定会对我们的传统工程方法,特别是信息系统工程的方法提供新的、有益的改进意见。⁶

在经济学中,对于“看不见的手”作用已有许多讨论。人们注意到,在一定的条件下,市场机制会失灵,如出现不利选择、道德风险等。最有名的是阿克洛夫的旧汽车市场模型。但迄今为止,这些讨论多停留在定性的讨论上。利用CAS理论和SWARM平台可以模拟一些经济系统,再现一些经济现象,进行定量验证。

8.4 CAS理论的实现——SWARM的功能和应用

CAS理论的一个重要特点就是它的可操作性。圣菲研究所开发的软件平台——SWARM,具体实现了这个特点。为了帮助有兴趣的读者进入SWARM的应用环境,这里简要介绍这个软件平台的基本情况和若干实际使用的例子,读者可以由此对SWARM的功能和作用得到比较具体的认识。

8.4.1 SWARM的建模方法

圣菲研究所的SWARM是一个高效率的、可信的、可重用的软件实验平台,为科学家们提供了一个标准的软件工具集,从而提供一个设备精良的软件实验环境,帮助人们集中精力于复杂系统的研究工作,而不必自己动手制造工具。

SWARM的建模思想是建立一系列独立的个体,通过独立事件之间进行交互,考察和研究系统的行为和演化规律。在这种框架下,SWARM的使用者不必花费精力在特定模型的实现上。SWARM不限定特定的领域,例如空间环境、物理现象、个体表现或交互模式的不同。它可以用于不同的领域,如化学、经济、物理、人类学和政治科学等。

SWARM模拟的基本单位是个体,一个个体就像系统中的一个演员,它能够产生动作并影响自身和其他个体。模拟包括几组交互作用的个体。例如,一个生态系统的模拟可以包括狼、兔子和胡萝卜。在一个经济学模拟中,个体则是公司、证券代理人、分红利者和中央银行。个体之间独立的、交互的模拟与连续系统的模拟不同。在连续系统模拟中,模拟现象往往是一组有关联的等式间的数量关系。

个体定义了SWARM系统中的基本对象,即模拟部件。时间表则定义

这些对象之间的事件发生的流程。在 SWARM 中,特定的行为发生在特定的时间,行为的发展按照时间表的规定进行。时间表是一个数据结构,包含了各种事件的执行顺序。例如,在狼/兔子这个模拟系统中就可能有三种行为:“兔子吃胡萝卜”,“兔子躲避狼的追踪”和“狼吃兔子”。每种行为是一个独立的动作。在时间表中,对这三种行为按照以下顺序排序:“每天,兔子先吃胡萝卜,然后它们躲避狼的追踪,最后狼试图吃兔子。”模型将按照这种安排好的事件的执行顺序向前发展。

8.4.2 基于 SWARM 的模型实例

为了使读者能够具体地体会 SWARM 的功能和作用,我们在这里提供 4 个经济学领域的实际例子。这些例子是中国人民大学经济科学实验室研究应用 SWARM 的初步成果。对于每个例子,我们首先介绍其经济学上的含义,然后说明模型的基本框架,并且给出运行的结果。考虑到本书的目的和对象,具体的代码编写没有给出。

8.4.2.1 阿克罗夫模型

(一) 模型介绍

阿克罗夫模型(Akerlof model)是信息经济学中的一个经典模型。它描述的是非对称信息环境下的不利选择问题。它显示了在某种特定的情况下,一类低效率的市场是如何产生的。

不利选择是指在建立委托人—代理人关系以前,代理人已经掌握了某些委托人不知道的信息,而这些信息有可能对委托人是有害的。代理人利用这些信息签订对自己有利的合同,而委托人则由于信息劣势而处于不利的选择位置上,这就是所谓不利选择。目前有关不利选择问题的研究基本上是从产品销售、保险和资本市场三个方面展开的。

阿克罗夫模型以旧车市场上旧车的销售情况,来解释产品销售方面的不利选择问题。

在一般情况下,人们要想确切分辨出旧汽车市场上哪些是高质量汽车,哪些是低质量汽车是困难的。一辆外表全新的汽车也有可能是低质量汽车。由于买主无法了解汽车的质量,所有外表相同的汽车都将以同样的价格出售。这样,高质量的汽车在旧车市场上就无法以预期的高价格出售。这对于卖主是不利的。但另一方面由于高质量的车的确有可能在旧车市场上存在,顾客偶然也能在这里以买卖双方都满意的价格买到高质量的车。这样就使得低质量汽车的卖主不愿意以较低价格卖出,直到旧汽车的低质

量性质充分显示出来为止。从买卖双方的分析可以看出,从效用最大化的角度来讲,人们更愿意培养低质量汽车占大多数的旧汽车市场,因此,拥有高质量汽车的卖主往往将他们的汽车撤出市场。这样旧汽车市场上汽车的平均价格在下降。简单地说,那些低质量的汽车将高质量的汽车排挤到市场之外。这就是一个典型的不利选择问题。

由此,阿克罗夫模型解释了为什么即使是只使用过一次的“新”汽车,在旧汽车市场上也难以卖到高价钱。更为重要的是,这种现象与传统经济学概念——商品质量决定其市场价格——相悖,在非对称信息环境中,商品质量依赖于价格。这也是市场参加者以价格判断商品质量的信息经济学解释。当然,实际的经济环境比上面的分析更复杂,因为市场不仅仅是由高质量和低质量的车组成的,而且随着各种因素的变化,市场中旧汽车的质量也会发生变化。

综上所述,汽车的市场价格依赖于市场上所提供的汽车的平均质量,而市场上提供的汽车的平均质量又取决于汽车的市场价格。于是开始,在高价格水平上,许多汽车都被置于市场上出售,这样,市场上汽车的平均质量也就随之升高了。然而随着大量的汽车被置于市场上出售,市场逐渐出现供大于求的现象,从而导致市场价格的下降。当市场价格降到一定程度以后,那些高质量汽车就被撤出市场,从而导致市场汽车的平均质量进一步下降。结果汽车的边际效用随之降低,而人们愿意支付的价格也就越来越低,如此循环。最后市场充斥着大量低质量汽车,这样产生的销售合同肯定是非常少的,这种市场最终由于人们对低质量汽车的需求丧失而消失。很明显这是一种低效率的市场。

我们从不利选择的理论上进一步总结这个汽车市场的例子。在一般商品销售市场上,产品质量的不确定性是不利选择的根本原因,而基于产品质量不确定性基础上的市场信息差别是不利选择的直接诱惑因素。当市场商品以不同质量交换时,买卖双方都将以同样方式按照产品质量将产品进行分类,但是,只有卖主能够观察到他们所销售的每个单位产品的质量,而买主在购买前最多只能够观察到产品质量的分布,也就是说,买主在购买产品前并不能确切了解每个单位产品的具体质量,最多只能够了解这类产品质量的平均分布。由于没有其他任何方式使买主确定每个单位产品的具体质量,这样,低质量产品往往随着高质量产品一起销售。从买方市场看,在这样的市场中进行选择是不利的。

(二) 模型的实现

我们利用 SWARM 建立阿克罗夫模型,观察其运行状况是否与模型所预测的相符,同时也希望以此检验 SWARM 工具的可用性。这个模型的基本构造如下:

模型所涉及的对象:(1) 汽车。汽车是市场上被交易的对象。汽车的价格是由其质量决定的,为简便起见,认为该汽车市场上只有两种汽车,分别是高质量的和低质量的,其期望售价分别为 4000 元和 2000 元。每一辆进入市场的汽车都有相同的被询价的可能性。一辆汽车被询价之后,如果买方给出的价格高于期望售价,则交易成功,否则按照一个给定的较低概率成交。这与实际市场上的情况是一致的,即一辆汽车赔本卖出的可能性保持在很低的水平上。实际上模型中的一个汽车对象代表了汽车与其卖主的总和(汽车的属性和卖主的行为)。(2) 市场。这里,市场被设计成容量固定的。市场能够记录当前高质量和低质量的汽车的数量,也能记录当前卖出的高质量和低质量的汽车的数量。市场上的交易是一轮一轮进行的。为表示出市场上交易双方的信息不对称,对于卖方,汽车的信息是完全的,即卖方知道汽车是高质量的还是低质量的,但是买方并不知道汽车是高质量还是低质量的,只能根据上一轮的交易情况预测本轮交易中市场上高质量和低质量汽车的比例,并以此为基础给出买方购买汽车的期望价格。市场上发生交易后,需要有新的卖方进入市场,一辆汽车如果在多轮交易后还不能被卖掉,将自动退出市场。考虑实际市场的情况,新的卖方进入市场时,被卖车辆是高质量的还是低质量的也是由上一轮交易中卖出的高、低质量的汽车的比例决定其概率的。

上述两个对象各自有自己的行为动作。对于卖方来说,每轮交易中每辆汽车根据给定的概率决定自身是否被询价,一旦被询价则判断卖方与买方各自的期望价格,如果买方出价高于卖方的价格则成交,否则按照一个较低的给定成交率决定是否成交。市场在本轮交易结束后的动作是统计本轮交易中成交的高、低质量的汽车的各自数量,并且根据该数量计算下一轮交易的买方期望价格。对于交易完成的汽车和那些多轮交易后仍不能成交的汽车,则自动退出市场,由新的汽车补充进来。

根据上述模型建立起对应的 SWARM 模型,并实际运行,可以看到模拟的结果与该模型的预测符合得很好。如图 8.4.1 所示:控制面板控制模型运行的开始、结束和分步运行;观察员 CarsMarketObserver 设置其刷新频率;

CarsMarketModelSwarm 设置参与汽车的数量和被询价的概率;阿克罗夫模型的窗口则显示随时间的变化所有汽车销售价格的总和的变化情况,是主要部分。从图中可以看到市场上所有汽车销售的总价格逐渐下降,说明高质量的汽车被逐步挤出了市场。

阿克罗夫模型的运行结果如图 8.4.1 所示。SWARM 在这里提供了 4 个窗口,分别显示参数及模型的运行结果。这就是 SWARM 典型的运行环境。研究者可以利用 CarsMarketModelSwarm 和 CarsMarketObserve 两个窗口调整运行和观察的有关参数,用控制窗口反复运行和观察其结果。

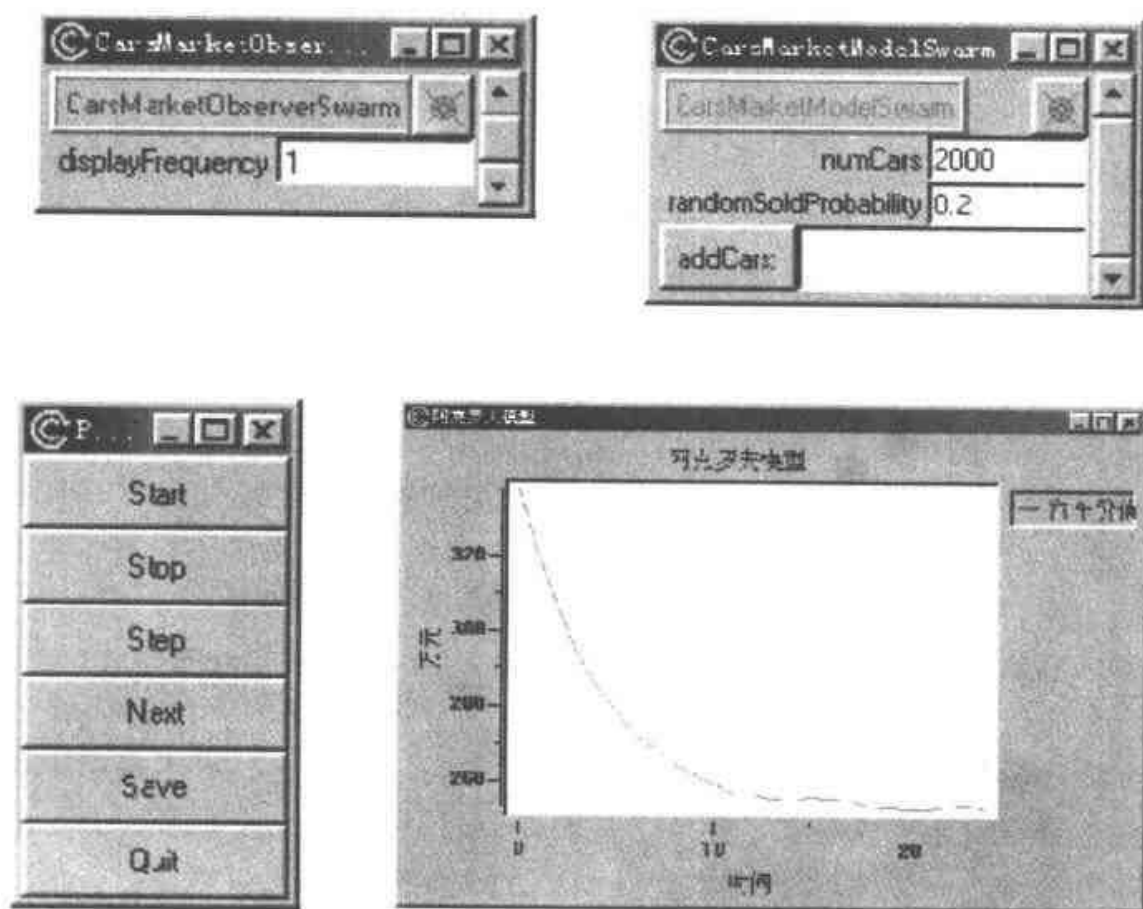


图 8.4.1 阿克罗夫模型的运行结果

至于如何编写程序,实现上述 4 个窗口以及相关的运行,则需要一定的程序设计的经验和知识。

8.4.2.2 基于主体经济模拟的建立——对 ASPEN 的仿制

(一) 模型介绍

ASPEN 是由美国桑迪亚国家实验室开发完成的关于美国经济的模拟

系统,国内媒体已经有多次报道,引起了学术界的关注。其建模的主要方法是所谓的多主体方法,并且在主体的实现上采取了与 CAS 理论非常接近的方法——为主体赋予适应性。

以往对国家的经济情况进行建模的方法,主要是建立宏观模型或 CGE 模型。而 ASPEN 所采用的建模方法与以往建模方法最基本的区别在于: ASPEN 模型中所观察或预测的各种经济指标拥有实在的微观基础,在多主体方法中,经济系统里的每一个决策者——家庭、企业、政府、银行等等都在模拟系统中有所反映。而这些决策者在模拟系统中的决策行为按照适应性学习的方法获得,与现实生活中的决策机制是一致的。

如图 8.4.2 所示,ASPEN 中包含了家庭、企业、政府、银行、联邦储备、金融市场等多类主体,这些主体在劳动力市场、产品市场、债券市场和贷款市场上分别发生雇用和被雇用、产品需求和提供、债券买卖和借款贷款等行为。而企业在制定产品价格,银行在决定贷款利率时都采用了遗传算法分类学习系统(GALCS),使得这些决策行为更加符合这些主体在现实生活中的原型。

ASPEN 运行于一个大规模的并行计算环境下,模型中的各个主体按照一定的原则分布不同的主机上,通过高速的网络环境进行通信。因此,ASPEN 中的主体的个数可以不受单机计算条件的限制。

(二) 模型描述

与真实经济环境类似,模型中的经济环境包括如下成员:生产者——各类制造商,消费者——主要是家庭,政策决策者——政府,金融机构——银行,金融管理机构——联邦储备局。上述成员在模型中都有对应的主体加以模拟。具体来说,模型中描绘了上述经济成员在产品市场、劳动力市场、贷款市场和债券市场上的各种行为。如图 8.4.2 所示:

各个主体的具体说明如下:

(1) 家庭

家庭是模型中数量最多的一类主体。对于一个家庭来说,其收入的主要来源是被雇用后得到的工资收入。雇主是前述 4 种企业消费品制造企业、银行、房地产商、资本工具制造商或政府部门之一。对于一个家庭来说,如果处于失业状态,则政府会支付福利金。福利金的金额由家庭的人口数决定。对于年长的市民来说,可以得到社会保险金。家庭的其他收入还包括了债券利息、存款利息和企业利润的分配(参见公司主体)。对于上述各

项收入,家庭按照单一税制交税。

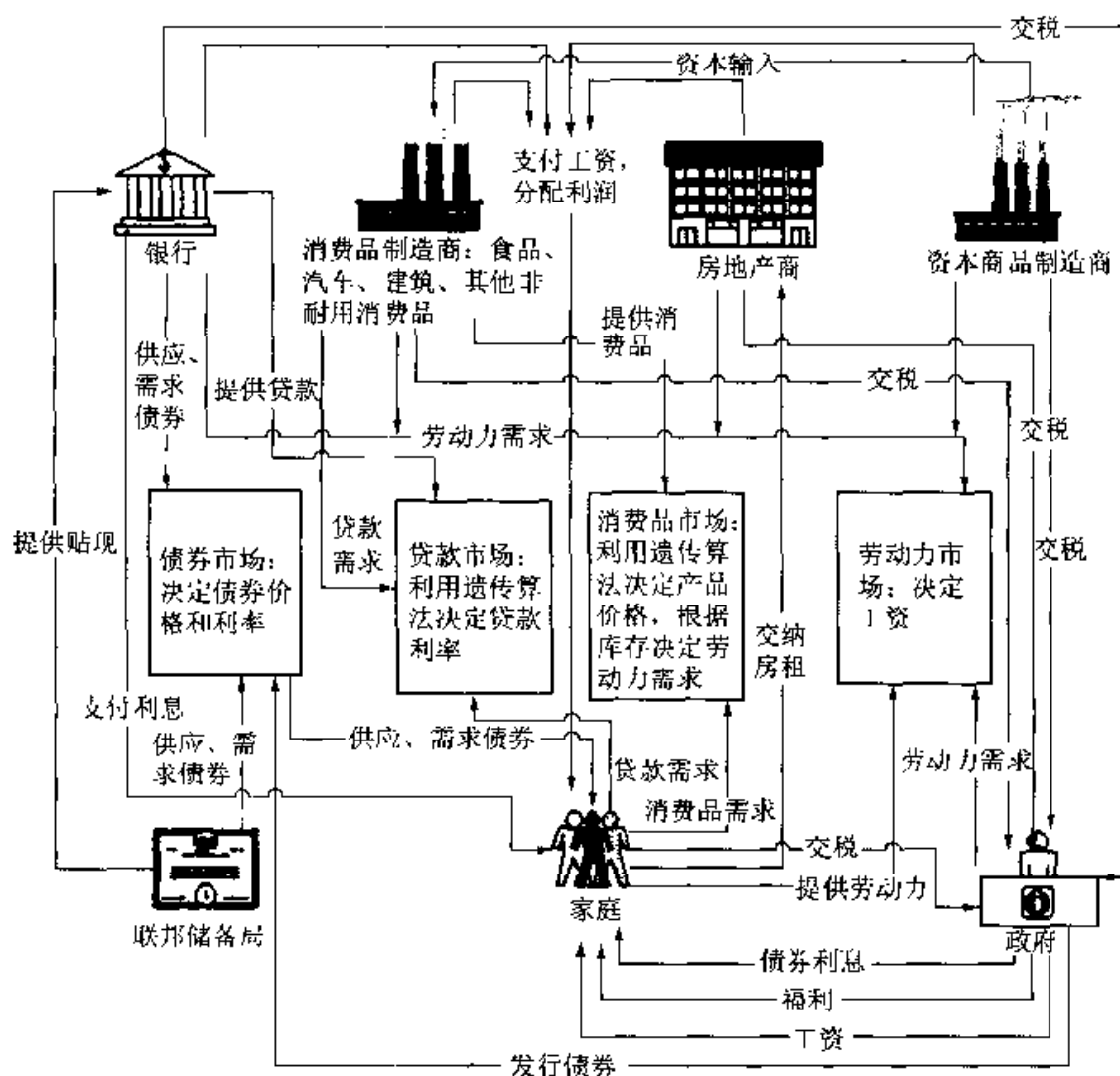


图 8.4.2 主体之间的交互关系

家庭的消费包括如下 4 个部分:食品、其他非耐用消费品、与交通和住宿相关的商品或服务。在我们的模型中,主体对消费品的需求决策与常规的方法不同,这里没有一个在可行性约束条件下的效益最大化函数,而是采用了模拟的技术和合理的假设。

每天,家庭对食品的需求估计取决于家庭的人口数。一旦需求的数量决定了,家庭会寻找一家合适的食品公司采购。寻找的过程是这样的:首先,各个食品公司每天报出自己的单位商品价格,家庭参考各个食品公司的价格列表,假设公司 f 的报价是 $p(f)$,则家庭从该公司购买食品的概率是:

$kp(f)^{-q}$, 其中: q 是一个给定的指数参数, k 是用来将概率向量标准化的常数。这意味着, $p(f)$ 相对于其他的食品公司越低, 家庭从该食品公司购买食品的可能性就越大。

家庭对于其他非耐用消费品的需求决定过程是类似的, 不过其需求量的计算方法有所不同:

需求量 = r (家庭收入-用于食品的支出)/非耐用消费品的平均价格。
这里 r 是一个给定的比例常数。

通常情况下, 家庭拥有汽车, 因此没有交通方面的需求。但是, 每天, 按照一个给定的概率(来自于统计数字), 家庭的汽车可能报废, 在这种情况下, 家庭将试图购买一辆新汽车。与购买食品的方式相似, 家庭根据制造商的报价决定从哪一家公司购买汽车。如果银行存款足够多, 家庭可能会购买一辆豪华汽车, 其价格是普通汽车的两倍。否则, 家庭会选择一家银行申请汽车贷款。同样的, 贷款利率最低的银行最有可能被选中。贷款数额应该不超过家庭 5 年总计收入的 10%。贷款的数量决定了购买汽车的数量和类型。因此, 家庭对汽车的需求是一个以家庭收入、存款和银行利率为参数的函数。

家庭对住房的需求与对汽车的需求类似。在初始状态下, 每个家庭可能自己拥有住房也可能从房地产商那里租住房屋。如果是租住房屋, 房客每天将收入的一个给定比例作为房租上缴。同时, 依据一个概率, 这些房客每天可能产生购买住房的愿望。而已经拥有住房的家庭每天依据另一个概率(与债券价格相关)产生改善住房的愿望。这些房客或房主会选择一家建筑商建造住房, 同时会选择一家银行申请抵押贷款。选择的方法依然是根据建筑上提供的价格和银行的贷款利率。

在消费上述 4 种消费品和服务之外, 家庭收入的剩余部分按如下方式分配: a) 持有一部分现金; b) 存入银行; c) 投资——买卖债券。

每天, 家庭都要保证手头持有固定数量的现金, 多余的部分则按照比例存入银行和用于投资。每 90 天, 家庭可能将存款从一家银行转到另一家银行, 存款利率高的银行可能吸引到更多的储户。

(2) 公司

模型中的 4 种消费品制造公司都是利用资本和劳动力制造商品。具体来说, 这些公司的生产函数表达为: $y = cK^aL^b$, 其中: y 表示公司一天的产量; K 表示公司拥有的机器数; L 表示公司的雇员数; a 、 b 、 c 是给定的常数,

对于不同的产业有着不同的数值。

公司可以通过改变 K 和 L 的值来调整产量。每年,公司可以申请商业贷款用于购买一台新的机器(增加 K)。公司通过权衡增加的产量与购买机器的费用以及贷款费用来决定是否申请贷款。另外,每天公司都可能解雇雇员或雇用更多的雇员。公司比较最近的平均日需求量和当前的库存量,如果库存与需求的差额小于一个给定的常数,公司提供就业机会雇用雇员,如果该差额大于一个给定的常数,公司则裁员限产。

在现有的模型中,对工资的设置比较简单,所有的公司(不分产业)对所有的雇员(不分教育背景和职务)提供相同水平的工资。

模型中利用遗传算法分类学习系统模拟企业指定产品价格的过程。每天,企业对如下 4 个趋势量进行判断:a) 产品的价格最近是上升了还是下降了;b) 最近的销售量是上升了还是下降了;c) 最近的利润是增加了还是减少了;d) 本公司的价格是高于还是低于该产品的市场平均价格。显然,根据上述 4 种趋势的判断,企业可能处于的状态共计 16 种。

遗传算法分类学习系统对每一种状态赋予一个概率向量(p^D, p^I, p^C),其中: p^D 表示下一次企业处于该种状态时采取降价措施的概率; p^I 表示采取涨价措施的概率; p^C 表示保持价格不变措施的概率;注意每次降价或涨价的幅度是一个给定的常数。

公司每天判断自己所进入一种状态,根据对应的概率向量随机决定如何改变价格。然后,公司主体根据价格的改变对利润的影响决定如何调整概率向量。例如,在某一特定时间状态 2 所对应的概率向量为(0.1, 0.6, 0.3),假设公司此时进入状态 2,此时生成一个随机数表明采用涨价措施。如果后来的事实证明涨价导致了利润下降,概率向量将被调整为(0.15, 0.5, 0.35)。于是,模型就模拟了公司价格决策的学习过程。主体学习到在状态 2 下涨价是错误的。作为对错误决定的一个反应,主体减少在状态 2 下涨价的概率。当公司再次进入状态 2 时,采取涨价措施的可能性会变小。

最后,公司需要根据利润额向政府缴利润税,根据工资总额缴纳社会保险税。对于税后利润的分配,在模型里依据一般均衡模型的思想,利润被平均分配到整个经济环境中的每个家庭。

(3) 银行

模型中的银行主体完成以下 4 种功能:a) 管理家庭在银行的存款户头;b) 买卖政府发行的债券;c) 贷款;d) 雇用少量的雇员。

如前所述,家庭每 90 天可能会将存款从一家银行转移到另一家银行。每天银行将存款利率定为债券的收益率的 $4/5$ 。因此,在目前的模型里,所有银行的存款利率是一致的,因此每一个银行的存款客户数大致相同。

每天银行必须保证一定的储备金(大约是存款总额的 4%),如果储备金额高于这个比例,银行将多余的部分用于购买债券。如果银行的现金资产达不到这个比例,银行不仅要卖出债券,而且要向联邦储备局主体申请贴现。

银行处理贷款业务时,贷款利率由两部分组成的:一部分由债券价格和银行缺省的贷款利率决定;另一部分则由遗传算法分类学习系统决定。银行决定贷款利率的遗传算法分类学习系统算法与公司定价的算法是类似的,银行的贷款利率对应于公司的产品价格,银行的贷款总额对应于公司的销售总额。一旦接到贷款申请,银行会考察:a) 贷款数量相对于申请者的收入来说是否过高;b) 最近贷款利率是否过高;c) 申请者是否已经申请过一笔贷款并且尚未偿清。如果上述一些条件满足,则银行拒绝该项贷款申请。

最后,银行雇用少量的雇员,雇员数与银行总资产成比例。以行业缴纳收入税和社会保险税。

(4) 政府

每天,模型中的政府主体从家庭、公司、银行那里征集各项税款(收入税、销售税、社会保险税),向失业者和年长者支付各种补助,对于以前发行的债券,政府需要支付利息。政府还要雇用人口总数的 25% 作为国家公务人员,为他们支付工资。政府完成了这些日常工作后,会核算收入和支出的差额,如果出现赤字,政府就通过发行债券进行弥补。在这个模型里,债券没有到期日,每年政府为每单位的债券支付 0.05 元的利息。初始的债券价格定为 1.00 元,缺省收益率为 0.05。但是,债券的价格不是一成不变的,债券的价格在债券市场上随需求和供给的变化而浮动。通过调整税率和政府的花费情况,模型可以模拟政府执行扩张性的或紧缩性的货币政策。

(5) 债券市场

如前所述,每天政府、家庭和银行都要决策各自要发行、购买、卖出多少债券。所有这些决策都被发送到一个特殊的主体“债券市场”上。市场根据各个主体的决策计算债券卖方和买方的数额差距,并将结果发送到联邦储备局主体,以供联邦储备局执行扩张性的、紧缩性的或稳定的货币政策时使

用(参见联邦储备局主体)。联邦储备局会根据具体情况决定发行、购买或卖出债券。

当所有的债券决策都被发送到债券市场主体后(包括联邦储备局的债券决策),市场会根据需求和供给的差额调整债券价格。假设,要求购买债券的数量多于要求卖出债券的数量,这意味着买方的货币值多于卖方的货币值。在这种情况下,市场满足所有的卖方请求,对于所有的买方请求满足一个相同的比例(即卖方总额/买方总额),同时债券价格上升。反之,如果要求卖出债券的数量多于要求购买债券的数量,这意味着卖方的货币值多于买方的货币值。在这种情况下,市场满足所有的买方请求,对于所有的卖方请求满足一个相同的比例(即买方总额/卖方总额),同时债券价格下降。

(6) 联邦储备局

模型中的联邦储备局主体执行的许多功能就是现实生活中“美联储”完成的功能。首先,如果一家银行不能满足对保证金的需求,联邦储备局根据给定的贴现率为银行提供贴现。其次,如果政府发行了债券而无人购买,则由联邦储备局统一收购这些债券。最后,联邦储备局可以根据债券市场提供的债券供需信息,实现扩张性的、紧缩性的或稳定的货币政策。如果联邦储备局执行的是扩张性货币政策,同时债券市场上卖方订单多于买方,此时,联邦储备局向债券市场提出购买请求;反之,如果联邦储备局执行的是紧缩性货币政策,同时债券市场上买方订单多于卖方,此时,联邦储备局向债券市场提出卖出请求;最后,如果联邦储备局执行的是稳定性货币政策,此时联邦储备局向债券市场提出购买或卖出请求以保证债券价格的恒定。

模型的用户可以在开始时选择执行扩张性、紧缩性、稳定的货币政策,或者选择不执行任何货币政策。

(7) 房地产商和资本商品制造商

房地产商主体从房客那里征收房租,为自己的雇员支付工资。房地产商的雇员数与房客总数成比例。资本商品制造商主体为消费品制造商生产机器(资本商品),它也雇用一部分劳动力并支付工资;雇员的数量是由订单数决定的。上述两个主体都不是真正意义上的公司,因为其价格是固定的并且没有竞争者。但是,这两个主体都要盈利、交税,并且按照与其他公司主体相同的方式将税后利润分配到经济环境中的所有家庭。

(三) 模型的技术实现

(1) 开发平台的选择

在系统的实现上,首先需要对硬件系统、操作系统以及开发工具等进行适当的选择。ASPEN 系统是在 Intel Paragon 并行计算环境下开发和运行的。其操作系统和开发工具是专用的。随计算机性能的不断提高,目前的很多单机运算能力已经超过了从前的并行系统。在我们的模型中选用的硬件系统为 Sun 工作站和 PC 工作站。

为获得更大的通用性和可移植性(开放),我们的开发选用了 SWARM 作为开发工具。其考虑首先在于,SWARM 是一个运行在 GNU 环境下的自由软件,这意味着凡是支持 GNU 的操作系统都可以支持该软件,因此在 Solaris、AIX、Linux 甚至 Windows 9x/NT 下都可以运行 SWARM 程序,并且充分实现了源代码级的可移植性。

其次,该工具是专门面向多主体建模的。在并行系统下主体之间复杂的消息传送机制在该工具中通过行为表的方式得以在单机环境下实现。SWARM 工具类库提供了对主体层次模型、多种随机分布和动态观测系统指标的支持。由于工具的支持使得主体的实现过程大大简化。使开发人员可以更加专注于模型本身。

(2) 主体的继承关系

这里我们用统一建模语言(UML)中的类图描述模型所涉及主体之间的继承关系,如图 8.4.3 所示。其中 SWObject 是一个抽象类,作为所有对象的根类,仅仅封装了对象的标识及相关操作。余下各类依次为:

表 8.4.1 主体类的描述

类名	主体	实例数	备注
SWHousehold	家庭	> = 1000	
SWGoverment	政府	1	
SWBank	银行	2	
SWFederalReserve	联邦储备局	1	
SWFinancialMarket	债券市场	1	
SWFirm	公司	0	封装了雇用、生产、销售和价格决策的方法
SWFirmFood	食品制造商	3	派生自 SWFirm

(续表)

类名	主体	实例数	备注
SWFirmAuto	汽车制造商	2	派生自 SWFirm
SWFirmOthers	其他非耐用消费品制造商	2	派生自 SWFirm
SWFirmConstruction	建筑商	2	派生自 SWFirm
SWFirmRealty	房地产商	1	派生自 SWFirm
SWFirmMachine	资本商品制造商	1	派生自 SWFirm

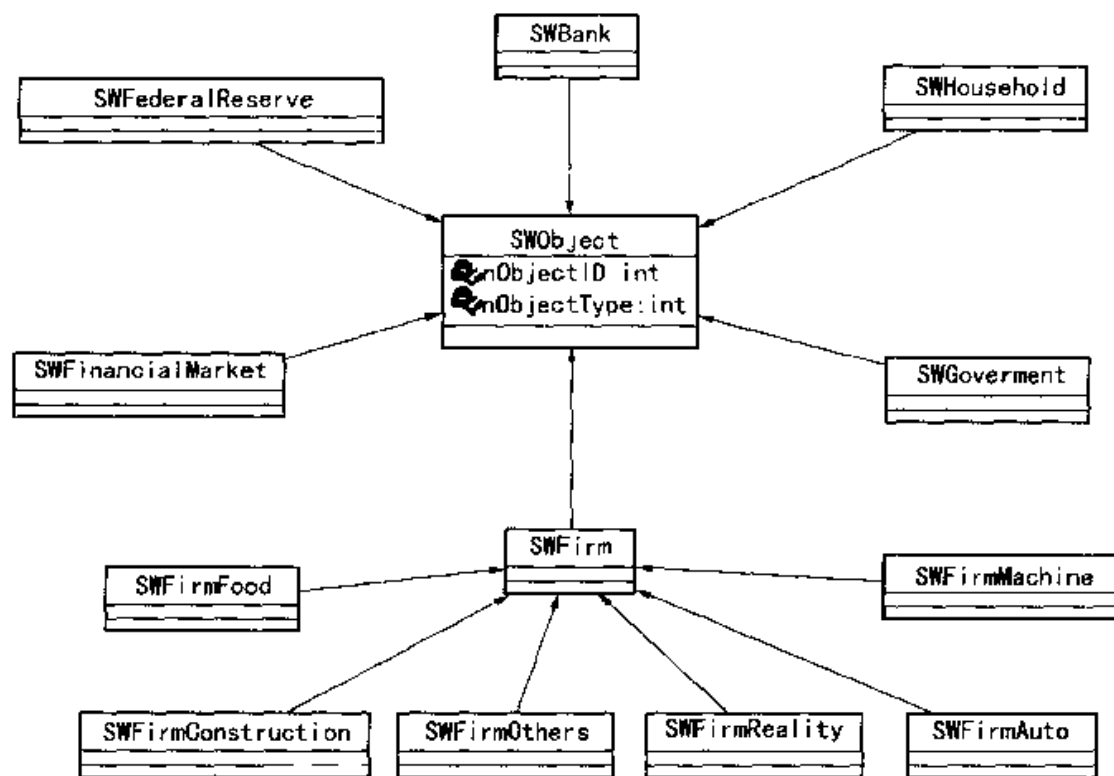


图 8.4.3 主体的继承关系

(3) 行为表的排列

如前所述,SWARM 采用对主体的行为排列行为表的方式实现对系统中并行交互的模拟过程。在模型的实现过程中我们将每一天分为 13 个时间步骤,在每个步骤里分别实现如下行为:

表 8.4.2 主体行为的执行顺序

步骤	主体	行为
1	政府	雇用或解雇雇员
	公司	
	银行	
2	政府	支付工资、保险和福利
	公司	支付工资
	银行	
3	公司	生产商品
4	公司	商品价格决策
	银行	贷款利率决策
5	家庭	家庭每日消费,获取消费贷款
6	家庭	交税
	银行	
	公司	
7	公司	税后利润的分配
	银行	每月初分配税后利润。日常投资、申请贴现
8	家庭	当日收入盈余的分配,投资
9	政府	计算赤字(发行债券)
10	债券市场	计算买卖双方的差异(不包含联邦储备局)
	联邦储备局	根据所执行的货币政策决定购买、出售或发行债券
	债券市场	达成交易,调整债券价格
11	家庭	每第 90 天选择新的存款银行
12	公司	每年第一天执行购买新机器的决策
13	所有	初始化每日参数

原则上,当一个行为涉及到多个主体时,该行为对应的方法实现在提出行为的主体类中。SWARM 提供了相应的调度机制,使得模拟过程中上述步

骤依次得到执行。为了更真实地模拟这些主体在现实生活中的行为,对于具有多个实例的主体,SWARM 支持按照随机的序列方式调用它们。例如,对于食品公司来说,在模型中共有 3 个实例,每天这 3 个食品公司都会雇用或解雇雇员,在随机调度方式下,虽然雇用和解雇过程是串行实现的,但每次调度的顺序都不相同,这就避免了模拟过程中容易出现的各种极端情况(有的公司总能雇用到工人而有的公司总也雇用不到)。

(4) 与 ASPEN 系统的对比

这里将我们的模型系统与 ASPEN 系统进行对比,如表 8.4.3 所示:

表 8.4.3 与原系统的对比

对比	ASPEN 系统	我们的模型
建模方法	多主体	多主体
运行环境	并行环境	单机环境
操作系统	并行操作系统	Solaris、Linux、AIX、Windows 9x/NT
开发工具	专用开发工具	自由软件 SWARM
决策手段	遗传算法分类学习系统	遗传算法分类学习系统
调度机制	网络消息传输机制	行为序列表

(四) 运行结果的初步分析

(1) 通过模型的运行,可以观察到经济生活中一些经济现象的产生。首先,可以观察到消费的波动现象。如图 8.4.4 所示。

家庭的平均纯消费数额是指模型中所有的家庭每日用于消费的平均金额,从图中可以看到消费呈现出一定的周期性,这表明了家庭每日消费支出与市场供给的互动关系。

(2) 遗传算法分类学习系统与公司的定价策略

根据微观经济学的传统分析方法,假设在某一产业中有两个处于竞争地位的公司,在本模型中可以用两个非耐用消费品公司示例。其中公司 A 的期望收益可以表达为: $\Pi_1 = (p_1 - C) * (p_1^{-q} / (p_1^{-q} + p_2^{-q})) * a$, 其中: p_1, p_2 表示两个公司的产品单价, q 表示需求指数, C 表示单位成本, a 表示市场需求常量。

可以证明,在两人对策的情况下,如果市场需求为固定量,当双方的定价为: $p_1 = p_2 = qC / (q - 2)$ 时,达到一般均衡。实际上,在我们运行模型的

过程中,公司的主体通过遗传算法分类学习系统算法,逐渐演化得到的价格
值与上述公式相符合,从而得到了按照对策论预期的结果。

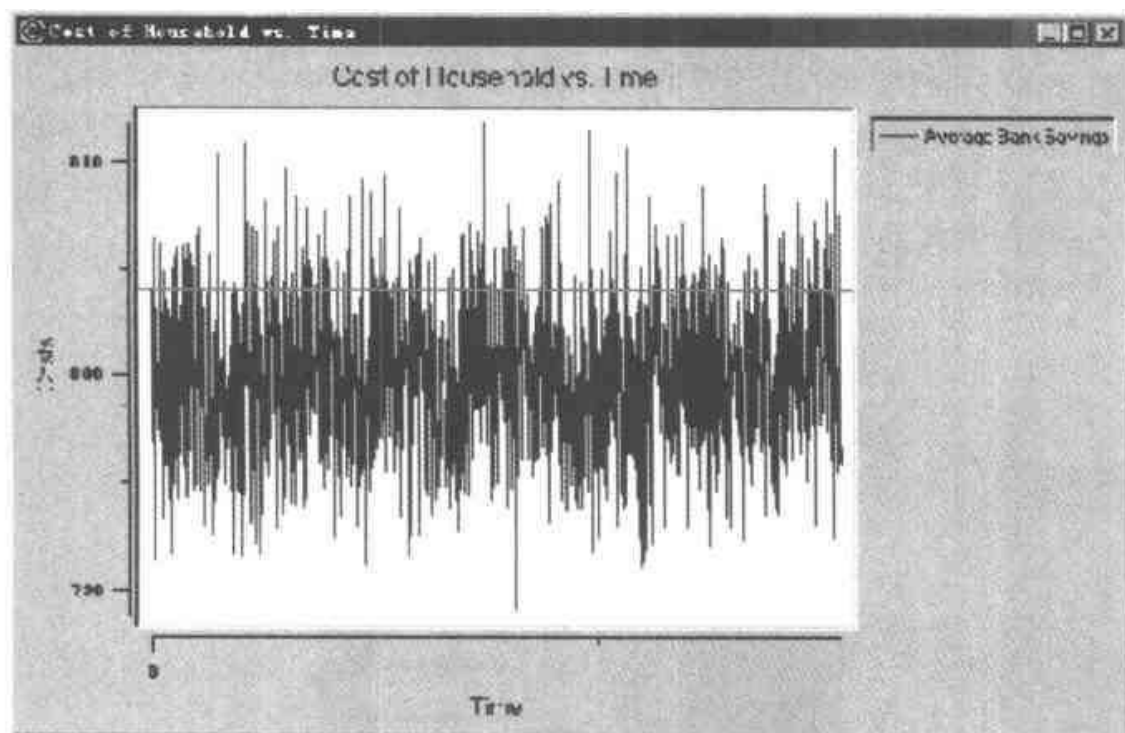


图 8.4.4 家庭的平均消费数额

8.4.2.3 国会山保姆公司模型

(一) 模型介绍

克鲁格曼(P. Krugman)的一本近作《萧条经济学的回归》⁷,以一个故事贯穿全书,这个故事最早出现在 J·斯威尼(J. Sweeney)和 R·斯威尼(R. Sweeney)于 1978 年发表的一篇文章“货币政策和大国会山保姆公司危机”。作者用国会山保姆公司这个缩小的经济实体来帮助人们认识经济衰退如何产生,以及如何对付衰退。受该书的启发,我们用计算机建模来模拟这件事情,从而为理解真实经济的兴衰提供关键的线索。

故事是这样的:70 年代,斯威尼夫妇是一家保姆合作社的会员。保姆合作社是一些主要在美国国会工作的年轻夫妇成立的组织,它们愿意彼此之间充当保姆。这家公司较大,有 150 对夫妇,与其他的机构一样,国会山保姆公司通过印刷临时票券来解决问题:每做 1 个小时的保姆工作(即照顾别人的孩子)可以得到 1 个单位的票券,反过来,请别人照顾孩子,则要付给别人 1 张票券。这套制度设计得很科学,它可以自动保证每对夫妇照顾别

人孩子的时间,与别人照顾自己孩子的时间相等(模型的参数录入窗口见图8.4.5)。

下图展示了模型中可以调整的参数。其中,numBabysitter表示保姆的数量,initProbability表示每种状态的初始概率,initTickets表示每个保姆的初始票数,observerdBabysitter表示被观测保姆的代号。minProbability表示每种状态的最小概率,maxProbability表示每种状态的最大概率。predictDays表示每个保姆对未来的预期天数。

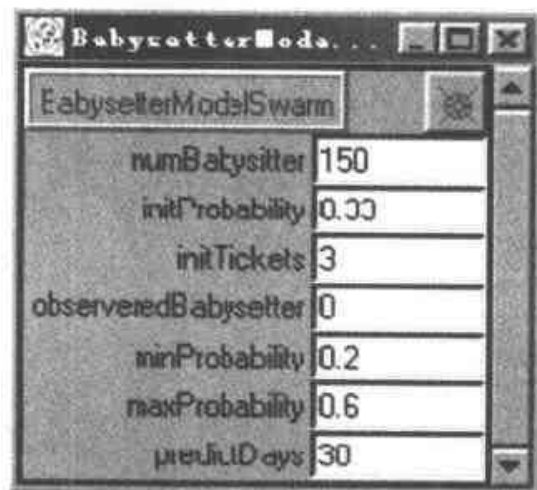


图 8.4.5 参数录入窗口

但事情并不那么简单,人们发现这个制度需要相当数量的票券来流通。连续几个晚上空闲、又没有马上外出计划的夫妇,要为未来打算积蓄一些票券,这种积蓄行为意味着其他人储蓄的票券会相应减少。时间一长,每对夫妇都要积蓄足够的票券,以方便自己外出时可以利用。而国会山保姆公司印制票券的过程很复杂。这里面的具体细节不重要,关键是到一定时间以后,流通中的票券就不够了,少到无法满足会员需求的程度了。

这个结果很突然,那些觉得自己积蓄的票券不够的夫妇,都急于帮别人照顾孩子,自己不愿意外出。夫妇们不愿意外出则意味着保姆工作越来越少;这反过来又使得夫妇们因得不到足够的票券而更加不愿意外出,如此循环,保姆的工作则更少了……于是,保姆公司的活动进入了衰退。

如果将保姆公司这个缩小的经济体扩大到一个真实的社会,将票券比作货币,那么这个故事就有它很强的经济学含义。我们希望通过计算机模拟来理解这个故事最主要的两个含义:一是衰退如何发生;另一个是如何对付衰退。

(二) 模型实现

我们采用了基于主体的计算机模拟,该模型由 150 个家庭实体和 1 个保姆公司组成。每个保姆对未来预期的票数为:

$$\text{NumTicket} = p * \text{predictDay}$$

也就是说,当一个保姆手中掌握的票数大于他/她预期的票数时,出行的概率增加,找工作的概率下降;否则,找工作的概率上升,出行的概率下降。

由图 8.4.6 可以看出,刚开始,找工作和出行的人数基本相等。经过一段时间后,找工作的人数逐渐上升,出行的人数急剧下降,最后稳定在一个较低的水平上。这是因为,人们手中的平均票数低于预期的票数,造成人们找工作的概率上升,出行的概率下降。这样,进一步造成劳动力市场的供大于求,使得失业率增加,找工作更难了。最终导致了整个市场的衰退。通过对参数的调整可以得到不同的结果。如图 8.4.7 所示,可以使出行人数和找工作的人数基本相等,并稳定在这个平均水平上。一种调整方式是增加每个保姆手中的初始票数,也就是增加整个市场的货币投放量。这样可以使得人们掌握的平均票数有可能大于预期票数,增加人们的消费需求。但同时会造成通货膨胀,引起难以预料的后果。另一种调整方式是减少人们的预期天数。我们知道,人们预期的天数越少,预期的票数也越少。通过完善和健全贷款制度、保险制度和社会保障金制度,使得人们不必由于对未来预期不理想而攒钱,也是扩大消费、避免衰退的一个手段。

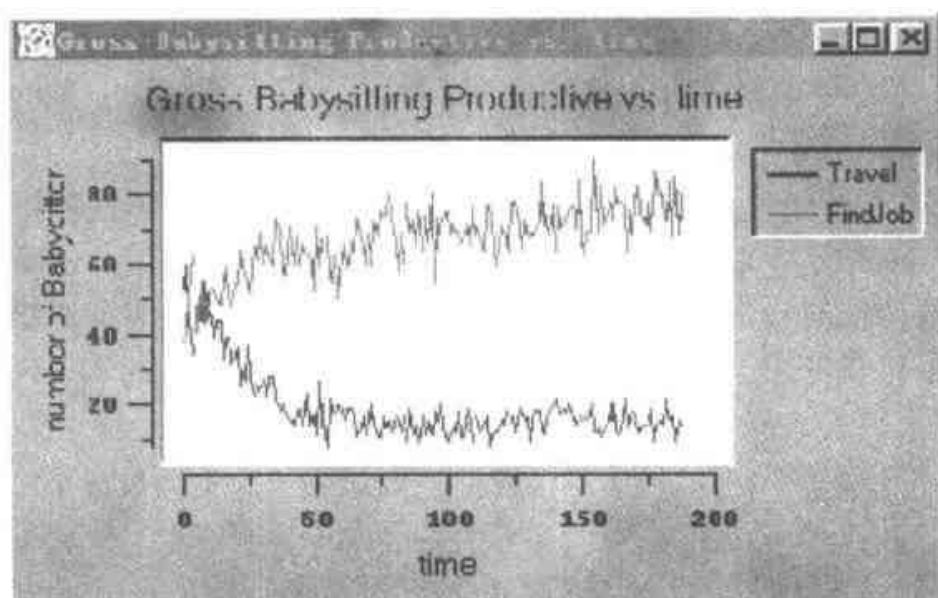


图 8.4.6 每天的出行人数和找工作人数

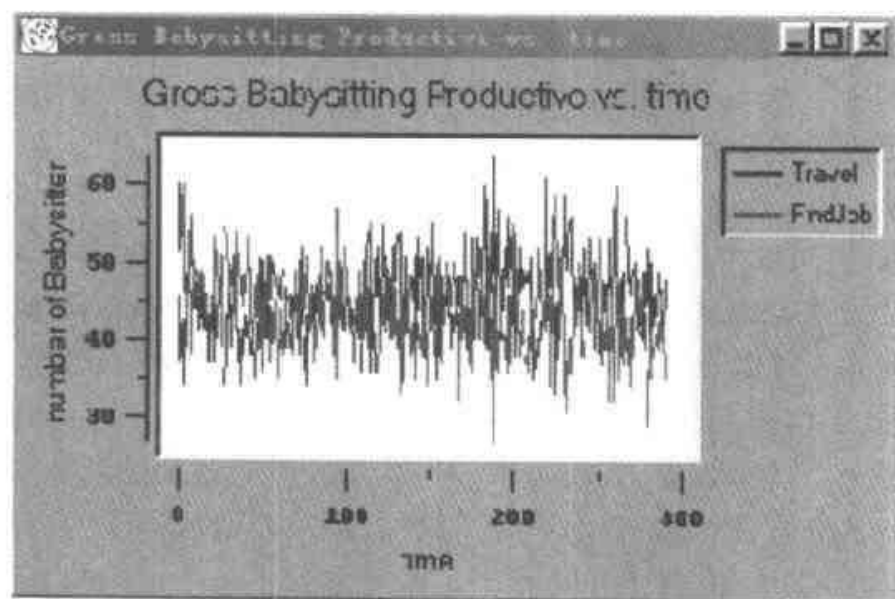


图 8.4.7 调整参数后的运行结果

通过这个模型,我们还意外地发现了贫富分化的现象。图 8.4.8 是在相同参数下,对两个不同“保姆”的观测结果。为了使模型更加真实,我们给每个“保姆”赋予一个不同的值来表示其的竞争力。竞争力越强的越容易找到工作。图的上方的是一个竞争力较强的“保姆”,其手中掌握的平均票数要大于下方的那个竞争力较弱的“保姆”。可见,如果不通过税收等调节手段,直接通过市场竞争的话,很容易出现贫富分化的状况。

这些结果使我们进一步确信,这种方法对于深入研究经济现象是很有启发的。

8.4.2.4 任务分配模型——纯遗传算法模型

(一) 模型介绍

在现实生活中常常会遇到任务分配的问题。如果一项任务由多人完成,那么如何在这多人之间分配任务是一个非常现实的问题。通常的情况下,由于这些人的自身条件不同,因此完成不同工作的效率也不相同。此时,有必要将任务的不同内容具体分配给不同的执行者,以达到最高的工作效率。

我们使用牛奶公司的例子具体说明。假设有一个牛奶公司负责一个特定社区内居民的牛奶供应。该公司拥有若干送牛奶的工人,分别居住在社区内不同的位置,他们负责将牛奶发送到居民家中。每天,牛奶公司首先用汽车将牛奶(成批)送到这些工人家里,然后这些工人再将牛奶送给居民。

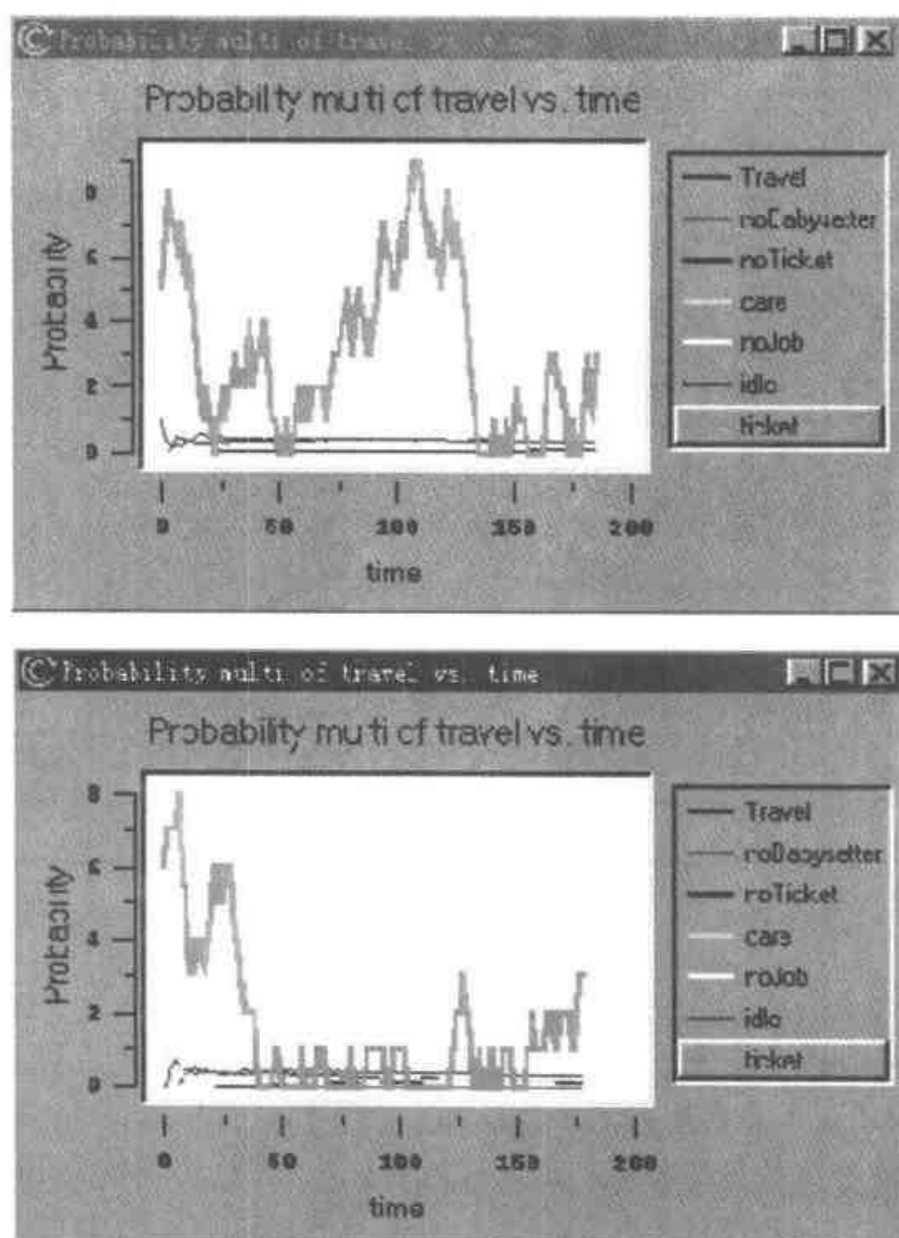


图 8.4.8 对两个不同“保姆”的观测结果

如果不进行特定的任务分配,这意味着对于某个给定的居民家庭来说,由哪个工人将牛奶送来是随机的,此时的工作效率明显较低。因为每个工人在完成自己的任务时所走的距离可以看作成本,如果任务分配得当(例如每个工人负责为离自己居住位置相对较近的家庭送牛奶),就可以减少这些工人完成每天的工作所需要走的距离,也就是实现较高的工作效率。这个模型的目的就是通过演化的算法(遗传算法)找出最有效的任务分配模式。

(二) 模型的实现

我们可以利用经典的遗传算法实现这一模型。

首先,假设社区可以表示为一个长度为 m , 宽度为 n 的矩形区域。并且假设牛奶公司的客户均匀分布在社区内。假设公司有 k 个工人,他们居住的位置分别表示为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ 。按照遗传算法的要求,我们需要用一个代码串来表示一种任务分配的模式。一个任务分配的模式就是该问题的一个解,我们的目的是找到使得所有工人每天行走的距离最小的解。这里我们用一个长度为 $m \times n$ 的 k 进制数字串来表示一个候选解,数字串中的每一位数字代表了负责为社区内相应位置的居民送牛奶的工人的代码。例如在一个长度为 6, 宽度为 4 的社区内,由 3 个工人负责完成任务,如表 8.4.4 所示:

表 8.4.4 一个候选解

1	2	3	2	1	2
1	2	1	3	2	3
3	2	1	3	1	2
1	3	2	3	1	3

(长度为 6, 宽度为 4 的社区, 由 3 个工人, 坐标格内的数表示负责为该位置的居民送牛奶的工人的代码。)

此时, 候选解表示为一个 3 进制 24 位数字串: 123 212 121 323 231 312 132 313。在我们的模型中, 遗传算法所要求的适应度函数认为与工人完成任务所需要走过的全部距离之和成反比。对于每一个候选解来说, 该距离之和的值越小, 则适应度越高。每个工人在完成任务时选择路线的原则是从自己居住的位置开始, 不断寻找下一个离当前位置最近的由自己负责的居民。例如, 图中第一个工人所选择的路线可能是: $(1, 1), (2, 1), (4, 1), (3, 3), (2, 3), (1, 5), (3, 5), (4, 5)$ 。其所经过的距离为 13。

在模型初始化阶段, 按照给定的参数生成 s 个随机的候选解, 分别计算它们的适应度, 也就是工人所走的距离总和。然后在每一轮的迭代过程中, 不断演化生成新的可行解。生成新的可行解的方法有 3 种: 复制、交换和突变。复制指的是从原有的一组候选解中挑选出两个加入到新的候选解组中。交换是指按照一定的概率(交换率)从原有的一组候选解中挑选出两个并随机选择一个位置, 在该位置上这两个解进行交换, 生成两个新的候选

解。突变是指按照一定的概率(突变率)在新生成的候选解的某一位上发生改变,用其他的有效数字代替该位上的数字。注意交换率一般不大于 0.2,突变率一般不大于 0.05。原有的候选解被选中进行复制或交换的概率是根据各个候选解的适应度而分配的。适应度越高的候选解被选中的概率也就越大。关于遗传算法的具体的实现细节可以参看有关文献。按照遗传算法的理论,适应度较高的候选解中含有具有较高适应性的“基因”——代码段,而通过复制、交换和突变的方法可以使这些基因保留下来并组合成新的具有更高适应性的解。因此,每一次迭代过程之后生成的新的可行解的平均适应度会不断提高。经过反复的迭代过程,有可能找到具有最大适应度的解。

我们用 SWARM 平台对上述模型的算法加以实现,并观察每次迭代之后新的候选解的平均适应度和最大适应度及其分配模式。

(三) 运行参数和结果分析

在运行模型时采用了不同的参数。以下是一组典型参数: $m = 10$; $n = 10$; $k = 2$; $s = 300$; 交换率 = 0.2; 突变率 = 0.03。迭代次数定为 5000 次。

在运行的过程中,可以看到每次迭代后的平均适应度基本上呈现出先不断上升然后逐渐趋于稳定的发展过程,如图 8.4.9 所示:

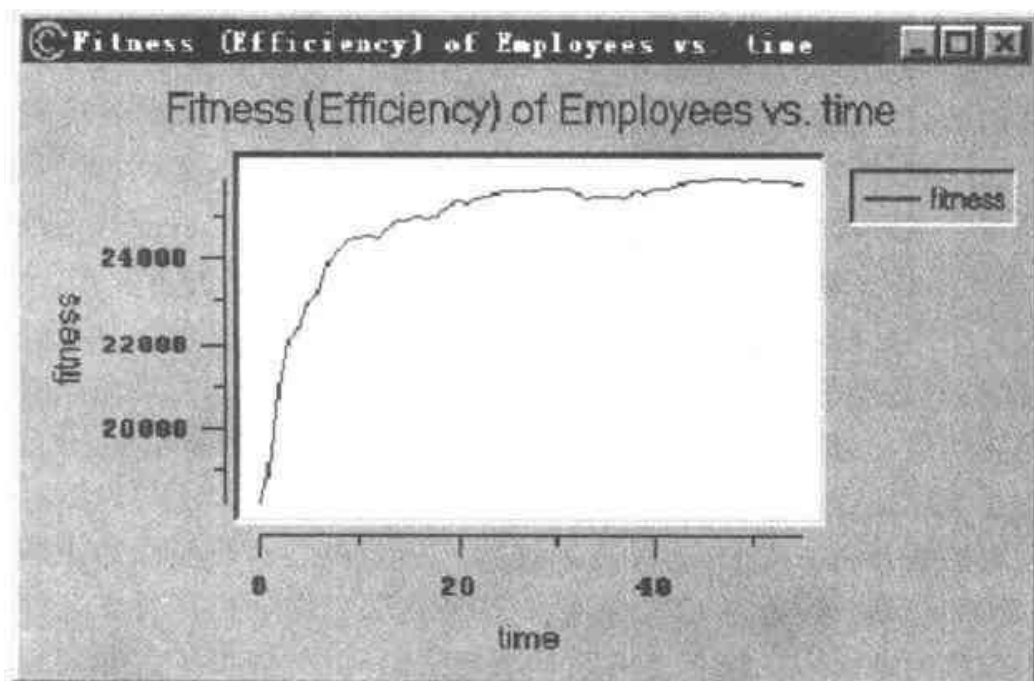


图 8.4.9 任务分配模型中的适应度发展过程

这个模型尽管很简单,但是具有一定的实用性。如果将社区表示为有向图的方式,将距离表示为有向图上各个边的权重,并在路线选择上同样用遗传算法加以实现。那么该模型就非常接近于现实生活中各种配送系统的模式从而得到广泛的应用。

以上几个例子虽然是很初步的,但是它们显示了 CAS 理论和 SWARM 平台的广阔应用前景。我们相信,这方面的研究将推动人类对于复杂系统的行为和规律的更深入、更符合实际的理解。

8.5 CAS 理论的应用

8.5.1 CAS 理论的主要应用领域

迄今为止,CAS 理论主要还是在理论界流传,然而其具有新意的思想,已经开始在一系列实际的应用领域中产生影响。

经济科学可以说是 CAS 理论产生的最主要的背景之一,因此,它也是 CAS 理论最先得到应用的领域之一。圣菲研究所中人数最多的课题组就是经济组。这个课题组先后发表了数十篇文章,并于 1988 年、1997 年先后两次出版了以《作为演化复杂系统的经济》为题的论文集⁸。在 1997 年出版的第二卷中收录了 21 篇论文。讨论涉及经济学中的许多问题,包括股市价格、微观经济行为的模型、市场结构的演化、经济地理分布的变迁、通货膨胀问题、经济活动中的对策问题等等。把参与经济活动的企业或个人,看作是被动、行为方式几乎是固定的,这恰恰是传统的经济学偏离现实情况,无法正确反映实际的根源之一。上述论文集集中的许多文章正是从扭转这种不符合实际的假说出发,从多方面探讨和研究经济生活中的各种现实问题,得出了许多新的、富有启发性的见解。近年来,经济的国际化、全球化表明人类生产的社会化程度达到了一个新的、前所未有的水平,信息经济、知识经济、网络经济等新概念不断涌现,从跨国公司的迅速发展 to 东亚金融危机的突然爆发,都需要运用新的思想和观点去认识这些新现象,并且找出合理的对策。在这种情况下,CAS 理论恰好提供了新的方法与思路。正如该论文集的题目所表明的,把经济系统看作一个由具有适应性的主体构成的、处于不断演化过程中的复杂系统。这种新的思路为经济科学开辟了一个更为广阔的新天地。加上对策论等新方法的应用,使得经济学的理论取得了一系列新的突破。例如,对于市场机制失灵的认识,对于分工产生及变化过程的认识,对于微观经济学和宏观经济学之间的内在联系的认识等等。

生物科学也是 CAS 理论得到有效应用的一个重要领域。前面已经提到, CAS 理论中染色体、适应等许多重要概念都是从生物学中引伸而来的。生物体与人造的机器之间的根本区别就在于, 生物体中各个层次都有自己的内在的活力, 而不像机器中的零件那样, 完全是僵死的、被动的。如人体中的许多细微部分, 如血球、抗体、线粒体等都是以人体为环境的、活生生的、独立的生物体。它们各有自身的发展规律和行为模式, 各有自身的演变规律与演化过程, 而不是像机器零件那样, 任何一举一动都必须听从总控部分的指令。目前人们正是用这样的新观点来研究免疫系统的规律、DNA 分子的形成、生物体对外界环境的适应机制等具有重大现实意义的课题。显然, 在这些方面的进展, 对于医疗技术的进步, 对于许多疑难病症的治疗都有直接的影响。当然, 在这方面的另一个十分引人注目的课题就是对生命起源的探索。60~70 年代关于自组织现象的研究曾在这方面给人们以希望。CAS 理论的提出则进一步使自组织的过程具体化, 从而向更深入地理解生命起源与进化又前进了一步。

生态系统也是由活的、具有主动性的个体组成的复杂系统。按照有的专家的意见, 生态系统和生物体一样, 也有自己的生长、发育以至生老病死的生命周期, 甚至认为地球表面的生物圈就可以看作一个巨大的生物体。由于关于生态系统的研究与环境保护有直接的联系, 所以对它的研究在近年来得到了特别的关注。从 CAS 理论的角度来看, 生态系统中整个物种的运动规律和行为规则, 构成了整个生态系统演化规律的基础。生态系统宏观形态和状况的变化, 常常可以从微观物种的变化中找到意想不到的缘由, 从而为环境保护措施与政策的制定和选择提供依据。在圣菲研究所的工作中, 关于环境和生态系统的研究也占有重要的位置。

在管理与控制方面, CAS 理论的思想也正在得到应用。例如, 关于机器人的设计, 人们正在从集中控制、功能齐全的大型机器人转向研制和开发较小的、基本功能比较简单, 但是具有学习和适应功能的小型机器人。

在圣菲研究所的课题组中, 有一个组专门研究美国西南部各种文化的互相渗透、互相融合的过程。当然, 这种研究需要十分慎重十分具体, 而不是套用几个新的名词术语就能奏效的。然而, 这种思路的启发作用是十分明显的。

8.5.2 CAS 理论的进一步发展

CAS 理论是一个很新的领域, 距离成熟还有很大的历程。因此, 存在各

种不完善、不完全的问题是毫不奇怪的。从目前的情况来看,至少在以下几个方面,CAS理论还有待于进一步的发展与完善。

(1) CAS理论框架本身比较粗糙,带有十分明显的经济学与生物学的印记。从理论框架到名词术语都是如此。这说明我们还需要广泛地研究更多类型的复杂适应系统,并且逐步形成确实具有方法论和认识论意义上的,具有一定普遍性的理论体系和表达方式。具体地说,目前形式的ECHO模型还是具有相当强的人为性质的。霍兰在他的后一本书《涌现》⁹中也力图从更一般的视角来研究和表达他的观点。在该书中,他以跳棋、数字系统和中枢神经系统为例,把本章所讲的从微观适应到宏观演化的过程,进一步用受限发生规程(constrained generating procedure,简称CGP)概念加以概括。

(2) 关于CAS理论在系统科学中的位置问题也值得进一步探讨。到目前为止,包括霍兰本人在内,始终强调适应是产生复杂性的根源之一,而没有说它是唯一的途径。从系统科学的整个研究范围来说,很自然地会提出这样的问题,产生复杂性的途径有哪几种?适应在其中起的是什么样的作用?只有弄清楚了这些问题,我们才能对复杂性有更深入的理解和认识,也才能对CAS理论的地位与作用形成比较明确的认识。

(3) 从理论本身的概念与内容来说,也还有不少需要进一步明确的地方。例如,关于层次形成的机制,CAS理论虽然在ECHO模型的扩充过程中提到了新的更大的主体的形成过程,但是这种新的主体的形成条件,边界和功能的实现,与原有主体之间的关系等都还有待于进一步的思考与说明。层次问题如果弄不清楚,那么复杂系统的规律就不可能真正搞清楚。又如,在整个理论中,定量部分是比较薄弱的。关于遗传算法中的许多细节,如收敛性问题,收敛速度问题,信用分派中的计算规则问题,交换和突变的概率设定等。在定性和定量相结合的问题上,CAS理论建立了一个好的框架,但是许多细节需要补充与完善。

(4) 从实际应用的角度来看,除了需要应用到更广泛的范围之外,CAS理论还需要在实际的控制与管理方面提出有效的、切实可行的方法。到目前为止,它主要还是着重于解释和说明复杂适应系统的行为和发展规律,而没有深入讨论如何控制和管理这样的系统。如果能在在这方面提出进一步的具体意见,将会使它的实际价值大大提高。

(5) 作为支持CAS理论研究的工具与环境——SWARM,也还处于完善过程之中。在我们试用的过程中,感到SWARM的描述能力与表达能力还

存在不少缺陷。虽然它通过开放式的平台,为复杂系统的模式创造了环境,但是,迄今为止,它所能提供的函数还不够多,对于并行计算等问题还考虑得不够周到,使用也还不够方便。

总之,无论是理论方面还是应用方面,包括软件支持方面,CAS 理论都尚处于初始阶段,还有许多问题要深入研究。

CAS 理论问世不久,我国学术界就开始关注这一新方法,并尝试把它应用到自然科学和社会科学等诸多领域中去。2000 年 8 月,首次“复杂系统模拟在中国”学术研讨会在圣菲研究所举行,蒋正华、郝柏林、戴汝为等 9 名中国学者出席了研讨会,介绍了中国在该领域的成果。

第9章 开放的复杂巨系统

系统科学的先驱者贝塔朗菲于40年代末已经提出研究复杂性的问题,预见到系统科学本质上是研究复杂性的科学。信息论创始人之一的韦弗在同一时期提出有组织复杂性和无组织复杂性的划分,把有组织复杂性作为系统科学的研究对象¹,对其后的科学发展产生了深刻影响。但总的来说,那个时期的复杂性研究尚无实质性进展。在20世纪50~60年代,系统科学获得重要进展的分支是运筹学、控制论、信息论等技术科学,研究对象基本属于简单系统,尚未触及真正的复杂性。70年代以后,关于简单系统的理论日趋成熟,系统科学才真正转向以复杂性为主要对象,试图建立关于复杂系统的一般理论,如美国的圣菲研究所,欧洲大陆的自组织理论,英国的复杂性论坛,中国的系统学等。本章主要讨论钱学森等提出的复杂巨系统理论。

9.1 关于复杂性

按照传统的理解,简单与复杂是相对的,一个事物在未被认识之前是复杂的,一旦被认识就成为简单的了。从人类认识事物的过程看,这种情形是常见的。但现代科学技术的发展表明,不能把复杂性全部归结为认识过程的不充分性,必须承认存在客观的复杂性,真正的复杂性应当具备自身特有的规定性,即使已被人们认识,即使找到解决办法,它仍然是复杂的。就是说,应当找出简单性与复杂性之间某种根本性质的区别,使复杂性科学具有相对确定的研究领域。²

复杂性建立在多样性、差异性之上,应当承认不同意义上的复杂性,承认不同层次有不同的复杂性,允许使用不同的复杂性定义。据劳埃德(S. Lloyd)统计,西方学者已提出45种复杂性定义,如香农信息、费歇尔(Fisher)熵、信息、共有信息、玻尔兹曼熵、分数维、逻辑深度以及算法复杂性、同源复杂性、随机复杂性、时间计算复杂性、空间计算复杂性、复杂适应系统、混沌边缘等等。³这些定义大多数与信息的定量刻划有关,明显反映了提出者们试图沿袭定量化、形式化的传统方法描述复杂性,代表复杂性研究的一种思

路。复杂性研究要取得具体成果,必须注重各种特定的可以检验的机理,分门别类进行研究。所以,这些探索都是有益的。但是,单纯用定量化、形式化方法描述和解决复杂性问题只是对传统还原论方法的修正,不可能引向科学方法论的革命性变革。这一点也反映出复杂性研究的不成熟,尚未找到真正克服现有科学方法论局限性的有效途径。不过,其中有几项试图超越传统的思路,在复杂性探索中有重要启迪作用,值得稍加讨论。

西蒙的分层复杂性概念是1962年提出来的。在此之前,贝塔朗菲把等级层次原理作为一般系统论的支柱之一,表明他已意识到等级层次与复杂性有联系。西蒙把等级层次结构与复杂性明确联系起来,从4个方面给复杂性以系统阐述,指出等级层次结构是复杂性的重要来源。他从系统演化的角度讨论复杂性,论证复杂系统的结构是在演化过程中“涌现”出来的。⁴西蒙还讨论了按照层次结构组织起来的系统的动态性质,把复杂性与系统动力学特性联系起来。这些思想对其后的复杂性研究起了积极的推动作用。

普利高津、哈肯等人的贡献是用演化的、生成的、自组织的观点解释复杂性。传统观点认为复杂性出现于生物以上的层次,物理层次无复杂性可言。普利高津提出,复杂性存在于一切层次,不同层次的复杂性既有差别,又有同一性,物理层次已经具备“最低限度的复杂性”。平衡态、线性关系、可逆过程只能产生简单性,远离平衡态、非线性关系、不可逆过程是产生复杂性的根源。复杂性是自组织的产物,在远离平衡、非线性、不可逆的条件下,通过自发形成耗散结构这种自组织而产生出物理层次的复杂性,在此基础上才可能通过更高形式的自组织产生出生命、社会等层次的复杂性。基于这个认识,他们认为“物理学正处于结束‘现实世界简单性’信念的阶段”⁵,用复杂性科学表述正在兴起的新型科学。

90年代,盖尔曼提出有效复杂性概念,把它“定义为用来描述其(指复杂适应系统——引者)规律性的图式的长度”⁶,仍然属于西方学术界用定量化、形式化方式刻画复杂性的传统方法,决定了这个概念只能应用于较窄的范围。但他指出原始复杂性和算法复杂性不能表示通常理解的复杂性(并批评它们与“复杂性”所指的意思没有多大关系),反对就复杂性概念来研究复杂性,主张把复杂性研究同复杂适应系统的研究联系起来。盖尔曼围绕有效复杂性讨论所提出的种种议论,包含深刻的系统思想。

所有这些工作都有助于从某个侧面理解复杂性,为我们研究复杂性问

题提供了综合集成的资料、构件、局部的方法。但总的来看,复杂性还不能算作一个严格的科学概念,人们也没有给出一个公认的复杂性定义。

大体在同一时期,钱学森通过对系统科学及其应用的探索和研究,特别是在建立系统学的过程中,逐步认识到复杂性研究的重要理论和实践意义。“复杂性的问题,现在要特别地重视。因为我们讲国家的建设,社会的建设,都是复杂的问题。”“解决这些问题,科学技术就会有一个很大很大的发展。我们要跳出从几个世纪以前开始的一些科学研究方法的局限性。”⁷他明确指出:

凡是不能用还原论方法处理的或不宜用还原论方法处理的问题,而要用或宜用新的科学方法处理的问题,都是复杂性问题,复杂巨系统就是这类问题。⁸

从研究方法上区分简单性与复杂性,是一个很有价值的新观点。钱学森的复杂性研究走的是一条与西方学者不同的路子,他反对泛泛地讨论复杂性,主张把复杂性作为一类系统属性来对待。他对系统的分类就是基于复杂性的不同层次而给出的。复杂性研究不能从严格界定复杂性概念开始,与其空谈复杂性,不如从研究各种具体的复杂系统入手,寻找解决这些具体复杂系统问题的有效方法,通过对具体系统的深入工作,不断积累经验和知识,待条件成熟后再作概括性研究,建立理论体系。钱学森并明确提出“所谓‘复杂性’实际是开放的复杂巨系统的动力学,或开放的复杂巨系统学”⁹。从一开始就把复杂性研究明确纳入系统科学范围,这是钱学森有别于国外学者的一大特点。

9.2 把复杂性当作复杂性处理

科学研究对象从简单性和简单系统转向复杂性和复杂系统,要求在方法论上实现根本的转变。经典科学相信客观世界本质上是简单的,复杂性是披在简单性之上的面纱,随着科学的发展必将揭开这层面纱,把复杂性还原为简单性。因此,在面对复杂的问题时,总是设法把复杂性简化掉,即把复杂性当作简单性处理。当对象是典型的简单系统,或者属于不够典型的复杂性问题时,这样处理是可行的或近似可行的。当对象属于真正的复杂性问题时,这样处理必然把产生复杂性的根源简化掉,得到的结果不再能够反映对象的固有特性。把复杂性当作复杂性处理,是复杂性研究的方法论原则。这并非否定复杂性研究也需要简化,而是强调存在不同的简化路线

或指导思想。过去 400 年中发展起来的简化理论和方法,不适用于正在兴起的复杂性科学的需要。复杂性问题要求性质不同的简化路线,即必须在保留系统产生复杂性之根源的前提下进行简化。一种简化处理即使理论上十分漂亮,只要它没有保留系统产生复杂性的根源,就不是复杂性科学的简化方法。普利高津提出“结束现实世界简单性”的命题,圣菲研究所要建立复杂性科学,目的都是强调把复杂性当作复杂性处理这个新的科学方法论原则。

鉴于复杂性尚无统一定义,我们先就几类特殊的复杂性来分别说明这个原则。

(1) 把非线性当作非线性处理。

经典的简单性科学包含许多非线性问题,但正如第 3 章所指出的,基本的处理办法是把问题线性化,用线性模型近似代表非线性的原型,这就是把非线性当作线性来处理。线性化无疑把问题大大简化了,但同时也就把非线性产生的许多非平庸特性(如自激振荡、分岔、突变、混沌等)给简化掉了。当对象具有强非线性、特别是本质非线性时,系统研究真正关心的恰是这些非平庸特性,线性化处理无法保留这些非平庸特性,失去实际系统具有的本质特征。必须采取全新的简化方法,在保留非线性的前提下寻找描述非线性的简化方法。非线性科学就是把非线性当作非线性来研究的科学,也必须在把非线性当作非线性的前提下进行必要的简化处理。

(2) 把远离平衡态当作远离平衡态处理。

经典科学视平衡态为系统的唯一正常状态,把非平衡态理解为干扰因素造成的非正常状态,力求将平衡态下获得的结论线性地推广于非平衡态。但普利高津发现,系统在平衡态及其附近只能表现出简单的平庸行为,在离开平衡态足够远时才能够表现出各种非平庸的复杂行为。他率先突破平衡态物理学观点的束缚,把远离平衡态当作远离平衡态处理,创立了耗散结构论,给自组织现象以深刻的理论说明。

(3) 把混沌当作混沌处理。

简单性研究认为系统的定态只可能是平衡态或周期态,把非周期运动视为一种过渡态,随着系统逼近定态就会逐步消失。由于这种观念的束缚,尽管 19 世纪中叶以来的科学家不断接触到混沌现象,却总是把它们当作随机噪声。混沌学家的非凡之处在于率先摆脱这种传统见解,摒弃了把混沌性简化为非混沌性来处理的惯用方法,承认确定性系统可能内在地产生出

随机性,非周期运动也可能是系统的一种定态,并着手建立描述这种奇异行为的新理论。把混沌运动固有的不规则性、复杂性当作表面现象忽略掉,简化为规则的周期运动,或者当作随机扰动,是经典科学的方法论原则。其结果是把一般非线性系统固有的混沌运动人为地排除掉。从描述系统行为的非周期性入手,把混沌当作混沌来处理,是混沌学的方法论原则。

(4) 把分形当作分形处理。

分形有两个基本特征,一是粗糙性(不规则性),二是自相似性(部分与整体相似)。按照经典科学的方法处理,就是选定一个适当的尺度,把小于这个尺度的一切曲折性、不规则性忽略掉,化复杂的分形图形为至少是分段光滑的规整图形。这样做固然大大简化了问题,同时也就人为地消除了它固有的粗糙性和自相似性。芒德布罗反其道而行之,把粗糙性和自相似性当作这类对象的本质特征对待,即把分形当作分形来描述,创立了全新的分形几何学及其方法论。

(5) 把模糊性当作模糊性处理。

事物类属的不分明性即亦此亦彼性,称为模糊性。对于模糊性,有两种截然相反的处理方法。经典的方法是强行划定界限,人为地使每个对象都有明确的类属,即把模糊性简化为精确性来处理。另一种方法是承认事物固有的模糊性,用元素对集合的隶属度逐步变化来反映事物从属于某类到不属于该类的逐步变化,以模糊集合作为模糊事物的基本数学模型。从方法论看,这就是把模糊性当作模糊性来处理。依靠这种科学方法论,札德(L. A. Zadeh)创立了有深远影响的模糊理论。

非线性、远离平衡、混沌、分形、模糊性都是复杂性的某种表现。把非线性当作对线性的偏离,把远离平衡态当作对平衡态的扰动,把混沌当作复杂的规则运动,把分形当作复杂的规整图形,把模糊性当作复杂的精确性,都是把复杂性当作简单性来处理,结果只能是失败的。把非线性当作非线性,把远离平衡态当作远离平衡态,把混沌当作混沌,把分形当作分形,把模糊性当作模糊性,都是把复杂性当作复杂性来处理,都带来科学的重大进步。系统产生复杂性的根源多种多样,如开放性、不可逆性、不可积性、动力学特性、智能性、人的理性和非理性等。在每一种情形下都有两种截然不同的简化处理方式,只有在保留这些因素的前提下进行简化,即把复杂性当作复杂性处理,才是复杂系统理论所要求的简化。

非线性、远离平衡、混沌、分形、模糊性在简单巨系统中都可能出现,对

这些复杂性的处理仍然有路可寻,因而还不是最高层次的复杂性。生命、社会、思维等领域的复杂性,通常出现在复杂巨系统中,要比上述几种复杂得多,研究它们尤其需要实行把复杂性当作复杂性处理的方法论原则。坚持这个原则首先遇到的是方法论问题。对于这类系统,用还原论方法来处理是不行的(如果处理的是一个层次的系统问题,还原论方法可能还是适用的),因为从可观测的整个系统到子系统层次很多,中间的层次又不完全清楚,甚至有几个层次都无法确定,即使各个层次都清楚了,整个系统功能也不等于子系统功能的简单叠加,现有科学方法宝库中还没有适当的武器。

在军事系统工程和航天系统工程成功实践的基础上,从70年代末开始,钱学森努力把系统方法推广应用于社会生活各方面,提出建立和发展社会系统工程。但组织管理社会系统的社会工程技术要比工程系统工程复杂得多,前者绝不是后者的简单推广。这里也需要在应用中坚持把复杂性当作复杂性来处理的原则,反对那种为建立漂亮数学模型而对实际问题作强制性简化的主观主义做法。

从1986年春开始,在钱学森的倡议和指导下,组织了“系统学讨论班”的学术活动。围绕建立系统学这个中心目标,就与系统研究有关的学科理论,如非线性动力学、微分动力体系、混沌理论、自组织理论、超循环理论、突变论、系统动力学、现代控制论、博弈论、定量社会学以及人工智能、气象学、生态学、医学、数量经济学、军事科学、地理科学等学科的最新进展,组织学术报告和讨论,分析这些理论的得失长短,同时还就方法论和方法问题进行了广泛探讨,努力寻找处理复杂性的可行方法。在这个讨论班上,钱学森发表了很多重要科学思想,提炼出很多重要概念,总结和概括出系统的研究方法,开放的复杂巨系统及其方法论就是其中之一。

9.3 开放的复杂巨系统

本书2.5节给出钱学森的系统分类,现在简要说明这种分类的根据,介绍有关开放的复杂巨系统的几个基本概念。

9.3.1 巨系统

开创时期的系统科学所研究的大多是由少数基本环节构成的小系统。随着更多的实际系统进入研究范围,人们发现如果以组分(元素、子系统)数目作为系统的规模,则规模的不同也是造成系统性质不同的一个因素。基于这个认识,60年代末提出大系统概念和建立大系统理论的任务。随着社

会经济、生态环境等系统成为研究对象,人们发现还存在比大系统的规模大得多的系统。70年代末,钱学森在论述社会系统工程时指出:“这不只是大系统,而是‘巨系统’,是包括整个社会的系统。”¹⁰强调这类问题的范围之大和复杂程度之高是一般系统所没有的。这是学术界第一次提出巨系统概念。

按照上述定义,系统规模显然是一个模糊语言变量,它的基本变量(系统组分的数目)可以取任何正整数,规模小、规模大、规模巨大等是其基本语言值。按照规模对系统分类,得到小系统、大系统、巨系统三个基本类别,只是一种模糊的分类,彼此之间不存在截然分明的界限。大系统理论至今没有给出大系统的精确范围,也表明了这一点,但它并未影响对大系统的研究。对于巨系统概念,同样需要采取这种方式处理,不应苛求给出精确的分界线。大体上说,由几个、十几个元素或子系统组成的是小系统,由上百个、上千个元素或子系统组成的是大系统,如果元素或子系统数量极大,成万上亿、上百亿、万亿,那就是巨系统。

组分数目多到巨型规模,就使系统的整体行为相对于简单系统来说可能涌现出显著不同的性质。“量变可以引起质变:H.Haken等人的协同学证明这是可能的,即巨系统的统计理论说明巨系统中会出现简单系统中没有的现象,如自组织现象。”¹¹巨系统通常有宏观与微观的层次划分,系统在这两个层次上的行为特性有性质上的区别,这是不同于小系统和大系统的重要特点。巨系统是一个新的科学概念,代表系统思想的新高度,一种新的系统观点。对象性质的不同必然要求不同的研究方法。巨系统问题要求建立巨系统理论和方法。

9.3.2 复杂巨系统

巨系统在客观世界中是广泛存在的。不同巨系统之间在规模上仍可能有显著差别。第6章讨论的贝纳尔流作为物理系统,微观组分的数量级为 10^{23} ,社会系统的规模要比它小得多。中国是世界上人口最多的国家,微观组分(人)接近13亿,即 1.3×10^9 ,两者相比,前者的规模似乎比后者大得多。但众所周知,后者的描述要比前者困难得多。大脑作为系统,空间占有十分有限,所包含的神经元约 10^{11} 数量级,比贝纳尔流的组分少12个数量级;若从行为特性看,它的复杂性是贝纳尔流无法比拟的,属于典型的复杂系统,而贝纳尔流不属于复杂系统。这些事实表明,在巨系统这个等级上,再按照系统规模来分类已无实际意义,需要按照复杂性对系统进行分类。

从系统结构看,一方面是系统组分和种类的多少,另一方面是系统组分之间关联关系的复杂程度和层次结构。在巨系统中,如果系统组分种类不多,只有几种、几十种,相互关系又比较简单,应称为简单巨系统,如贝纳尔流和激光系统。对于简单巨系统,由于组分数量非常多,从组分间相互作用出发,直接综合成整个系统运动特性的处理方法,显然是不行的,即使使用巨型机也不能解决问题。直接综合方法不行,人们就想到统计力学的巨大成就。把亿万个分子组成的巨系统功能略去细节,用统计方法概括起来,取得了成功。这就是哈肯和普利高津建立自组织理论所用的方法,即从微观到宏观的统计综合方法。

在巨系统中,如果组分种类繁多(几十、上百、上千或更多),并有层次结构,它们之间的关联方式又很复杂(如非线性、不确定性、模糊性、动态性等),这就是复杂巨系统。这类系统无论在结构、功能、行为和演化方面都非常复杂,在时间、空间和功能上都存在层次结构,以至于到今天还有大量问题并不清楚。如人脑系统,由于记忆、推理和思维功能以及意识作用,其输入-输出反应特性极其复杂。人脑可以利用过去的信息(记忆)和未知的信息(推理),以及当时的输入信息和环境作用,能作出各种复杂反应。从时间角度看,这种反应可以是实时反应、滞后反应,甚至是超前反应;也可能是虚假反应,甚至没有反应。所以,人的行为并不是简单的“条件反射”。人脑系统吸引了众多科学家研究,其微观结构在细胞层次上正在逐步研究清楚,但在宏观层次上却涌现出思维、意识等极为复杂的整体功能,它的机制至今尚未探明。这个事实也说明,应把人脑作为复杂巨系统,把微观与宏观结合起来进行研究。

总之,系统理论和方法是发展的,不同类型的系统要用不同的方法。大系统理论不能用来解决巨系统问题,简单巨系统理论不能用来解决复杂巨系统问题。

9.3.3 开放的复杂巨系统

从贝塔朗菲起,系统研究就强调系统对环境的开放性。控制论等技术科学把开放性表述为系统的输入、输出和干扰,自组织理论把开放性表述为控制参量数对系统的影响和涨落的作用。但随着系统研究的深入发展,随着人类对工业文明造成的环境污染、资源匮乏、生态破坏的严重后果的认识,人们发现关于系统开放性的现有表述还很不够,有必要重新认识系统与环境的联系,进一步发展系统科学的开放性理论。因此,几乎在同一时期,

国外有所谓“开放系统科学”的提法¹²,在国内钱学森提出开放的复杂巨系统概念,积极探索建立开放的复杂巨系统理论。

在开放的复杂巨系统概念中,钱学森等给“开放的”一词赋予新的内涵。“开放的”不仅意味着系统一般地与环境进行物质、能量、信息的交换,接受环境的输入和扰动、向环境提供输出,而且还具有主动适应和进化的含义。首先是组成系统的个体或子系统,它们通过主动行为而获得信息,通过相互作用而交换信息,具有一定的“预见性”,能够在行动中学习,积累经验,获得知识,主动地、适应地改变自己的行为,不断进步。这就使得子系统之间关系不仅复杂,而且随时间及情况不同有极大的易变性。在个体主动性适应的基础上,形成整个巨系统在学习和适应性行为,因而系统的动力学特性也具有进化的含义,通过进化以更好地适应环境。

“开放的”还意味着在分析、设计或使用系统时,要重视系统行为对环境的影响,把系统运行与保护环境结合起来考虑。从简单系统到大系统,再到简单巨系统,现有的各种系统理论都只考虑环境对系统的塑造作用(而且作了极大的简化),不提及系统对环境的塑造作用。但处理开放的复杂巨系统问题时,必须同时考虑系统行为对环境的塑造,把系统发挥功能与保护环境结合起来,反对以牺牲环境为代价的系统优化,强调把系统优化与环境优化结合起来。这是系统思想的重大发展。

“开放的”还意味着系统不是既定的、不变的、完成了的,而是动态的和发展变化的,不断出现新现象、新问题,系统科学要求研究者必须以“开放的心态”对待问题。

上面的论述表明,在开放的复杂巨系统理论的形成过程中,“巨”、“复杂”、“开放的”三个限制词是逐步加上的。从一般的系统概念中区分出巨系统概念,把巨系统区分为简单的与复杂的两种,再强调系统的开放性,区分出开放的简单巨系统和开放的复杂巨系统(open complex giant system),代表钱学森 20 年来系统思想的三次飞跃:一般系统→巨系统→复杂巨系统→开放的复杂巨系统。

9.3.4 几类典型开放的复杂巨系统

从上节的讨论可以看出,开放的复杂巨系统广泛存在于现实世界。例如,人脑系统、人体系统、社会系统、地理环境系统(指地球表层以上、同温层以下包括生物圈在内的广阔系统)和星系系统等,它们之间有如图 9.3.1 所示的嵌套关系。

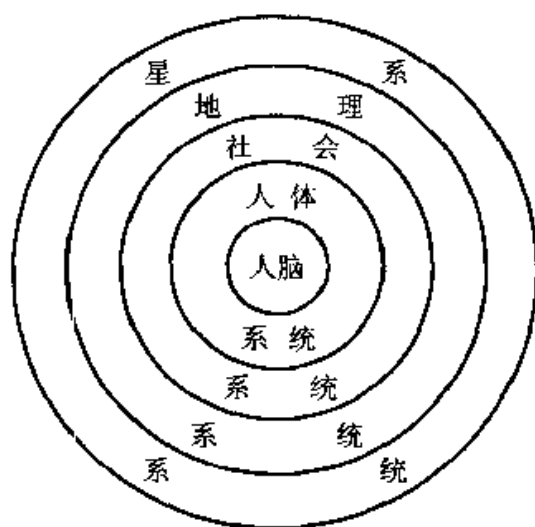


图 9.3.1

现代科学技术的发展已经取得巨大成就。今天,人类正在探索着从渺观、微观、宏观、宇观到胀观 5 个层次时空范围的客观世界,如图 9.3.2 所示。宏观层次就是我们所在的地球,其中又产生了生命、生物,出现了人类

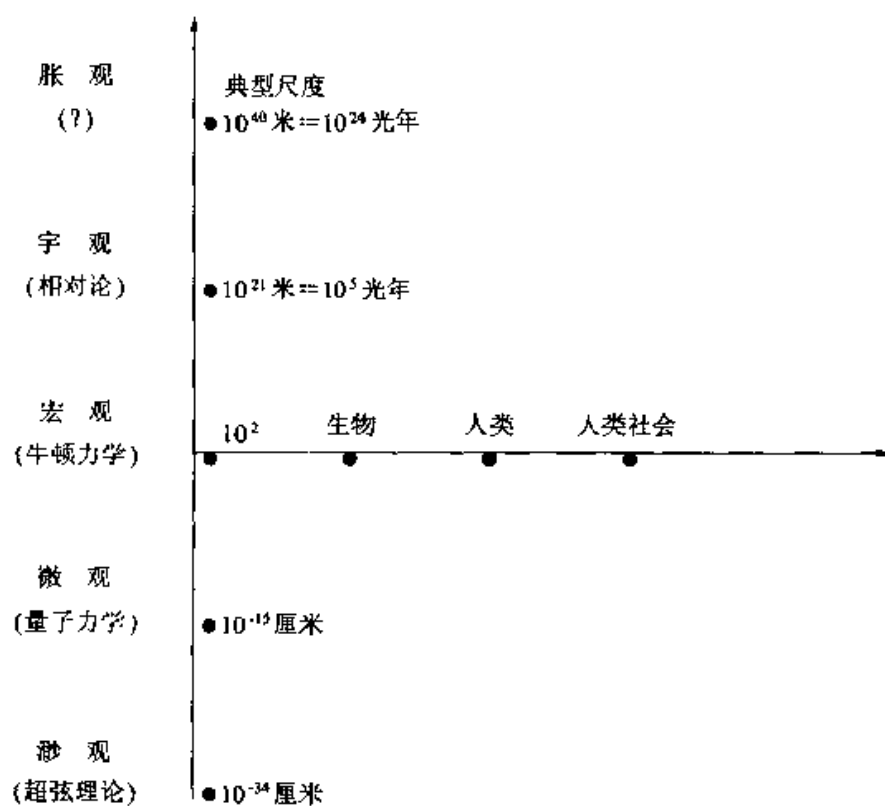


图 9.3.2

和人类社会。图 9.3.2 表明,开放的复杂巨系统分布在宏观及宏观以上的层次,宏观以下的层次属于盖尔曼所说的简单性问题,自然不是开放的复杂巨系统理论研究的对象。

从以上列举的实例可以看出,开放的复杂巨系统涉及到生物学、医学、地学、生态学、天文学和社会科学等学科领域。这些理论分属不同学科甚至不同科学技术部门,而且都有较长的历史。过去也都或多或少用各自的语言表述过开放的复杂巨系统这一思想,但现在都可以概括在开放的复杂巨系统这一概念中,而且更加清晰更加深刻了。这个事实启示我们,研究开放的复杂巨系统不仅能推动这些不同学科理论的发展,还为沟通这些理论开辟了新途径。

在开放的复杂巨系统中,社会系统是最复杂的一类,又称为特殊复杂的巨系统。下节将专门讨论它们。

9.3.5 社会——开放的特殊复杂巨系统

社会系统的微观组分是人,人本身就是开放的复杂巨系统。这就使得社会系统具有其他复杂巨系统所没有的复杂性质。

用系统观点研究和认识社会,提出社会系统概念,一方面是对社会实际的一种科学概括,另一方面有了这样的概念就为应用系统科学的理论、方法和技术去研究和解决社会问题提供了新的途径和方法,使它不同于现有的社会科学。但现有的社会科学中的一些概念、理论和方法,对于制定社会系统理论、方法和技术还是有价值的,钱学森就是根据社会形态这个概念从整体上研究了社会主义建设的系统结构、组织管理问题,提出社会系统工程及其实践形式。

社会形态这个概念是马克思首先提出来的。后来列宁(V. Lenin)又进一步指出:

一分析物质的社会关系……立刻就有可能看出重复性和常规性,就有可能把各国制度概括为社会形态这个基本概念。只有这种概括才使人有可能从记载(和从理想的观点来评价)社会现象进而以严格的科学态度去分析社会现象。¹³

社会形态是一定历史时期的社会经济制度、政治制度和思想文化体系的总称,是一定历史阶段上,生产力和生产关系、经济基础和上层建筑的具体的、历史的统一。把社会形态的概念和社会系统结合起来,尽管社会系统很复杂,“但从宏观角度看,这样复杂的社会系统,其形态,即社会形态最基本的

方面有三个,这就是经济的社会形态、政治的社会形态和意识的社会形态”¹⁴。经济的社会形态指经济制度,包含社会生产方式(生产、分配、交换、消费方式)、经济制度等;政治的社会形态指社会政治制度,包含国家政权性质、管理体制、法律制度等;意识的社会形态指思想文化体系,包含哲学、宗教、伦理道德,以及教育、科技、文学艺术等。社会形态三个侧面相互联系、相互作用、相互影响,从而构成一个社会的有机整体,形成社会系统结构。按照马克思列宁主义理论,经济的社会形态是基础,它决定了政治的社会形态和意识的社会形态。意识的社会形态不仅受经济的社会形态的影响,而且还要受政治的社会形态的制约。同时,意识的社会形态对政治的社会形态和经济的社会形态又有相对独立性和能动的反作用。政治的社会形态对经济的社会形态有强大的反作用,正如恩格斯所说:

它可以沿着同一方向起作用,在这种情况下就会发展得比较快;它可以沿着相反方向起作用,在这种情况下,像现在每个大民族的情况那样,它经过一定的时期都要崩溃;或者是它可以阻止经济发展沿着既定的方向走,而给它规定另外的方向——这种情况归根到底还是归结为前两种情况中的一种。但是很明显,在第二和第三种情况下,政治权力会给经济发展带来巨大的损害,并造成人力和物力的大量浪费。¹⁵

从社会进步和发展角度看,社会形态的三个侧面都处在不断运动和变化之中,而飞跃式的变化就是我们通常说的革命。“经济的社会形态的飞跃是产业革命,政治的社会形态的飞跃是政治革命,意识的社会形态的飞跃是文化革命……社会形态的变化、飞跃就是社会革命,但社会革命可以由不同侧面所引起,而且具有不同性质。产业革命、政治革命和文化革命都是社会革命。”¹⁶人类社会的发展,从原始社会、奴隶社会、封建社会、资本主义社会、社会主义社会到共产主义社会,都是从政治的社会形态来说的。

从社会发展和文明建设来看,相应于社会形态的三个侧面,也有三种文明建设,这就是经济建设即物质文明建设,政治建设即政治文明建设,思想文化建设即精神文明建设。结合我国社会实际情况,钱学森提出我国社会主义建设的系统结构:(1)社会主义物质文明建设,包含科技经济建设、人民体质建设;(2)社会主义精神文明建设,包含思想建设、文化建设;(3)社会主义政治文明建设(通称民主与法制建设),包含民主建设、法制建设、政体建设。这就是我国社会主义文明建设的三个方面。但国家和社会发展还要受到所处地理环境的影响,这就是系统科学讲的系统与其环境的关系。

社会系统的环境是地理系统,为使社会系统和地理系统协调发展,必须进行地理系统建设,即地理建设。(4)我国社会系统环境建设就是社会主义地理建设,包含基础设施建设、环境保护和生态建设。综合起来,我国社会主义现代化建设包含上述社会主义三个文明建设和地理建设,共四大领域、九个方面。在这九个方面中,科技建设是中心,体现了邓小平提出的经济建设为中心和科学技术是第一生产力的思想。

由于社会形态三个侧面相互联系,社会主义三个文明建设之间也相互联系、相互影响、相互作用。物质文明建设是基础,决定和制约着政治文明和经济文明建设;同时,精神文明和政治文明建设对物质文明建设又能产生巨大反作用,既可能起推动作用,也可能起阻碍甚至破坏作用,它们是物质文明建设的精神动力,并决定着物质文明建设的方向与速度。地理建设为社会主义物质文明建设提供持续而稳定的物质基础和优良的环境条件,也就是当今全人类共同关心的可持续发展。

按照系统理论,系统组分之间以及系统与环境之间只有相互协调,才能获得最好的整体功能。从这个角度看,社会主义三个文明建设之间必须协调发展,形成良性循环,才能使我国社会主义建设的速度更快、效率更高、效益更大。反之,如果不协调,社会主义建设就会受到影响,甚至造成巨大损失。我国的改革开放,从根本上说,就是改革那些影响四大领域和九个方面建设以及它们之间不协调发展的体制与机制。

这样看来,实践向我们提出一个十分重要的问题:如何才能使四大领域建设协调发展。这既需要科学的理论,又需要实践的技术。从理论方面看,首先是马克思主义哲学的指导作用,还需要有研究整个社会的学问——社会学,研究经济的社会形态即物质文明建设的学问——经济学,研究政治的社会形态即政治文明建设的学问——政治学,研究意识的社会形态即精神文明建设的学问——精神文明学,研究地理系统的学科——地理科学。由于社会系统、地理系统都是开放的复杂巨系统,又需要系统科学、数学科学等等,即整个现代科学技术体系的全部知识。这是从大的方面来说的,如果细分,可以说进行社会主义现代化建设需要整个现代科学技术体系的全部知识。

从实践角度看,四大领域建设是变革和建设社会与自然界的伟大实践,是一项极为复杂的大规模工程。既然是工程,是改造客观世界,就不仅要有科学理论,还需要可操作的技术。改造自然界的工程有工程技术,这是早已

很明确的。但社会科学长期没有社会工程技术概念。1980年钱学森曾指出：

可以看到要实现社会科学现代化,并把现代化的马克思主义社会科学用于改造客观世界,其实际规模和工作量决不下于现代工程技术,如大型水利工程或发射人造卫星的航天技术。社会科学要走出研究室到实践第一线,投入到改造社会的战斗中去。社会科学家要和组织管理专业人员一起,要和自然科学家和工程技术人员协作,搞大规模的工程。这就不只是研究科学了,而是一门技术,可以称作“社会技术”。所以社会科学现代化包括社会科学走向社会技术,要实现从科学到技术的这一重大发展。¹⁷

并且指出：

我们可以把完成上述组织管理社会主义建设的技術叫做社会工程。它是系统工程范畴的技术,但是范围和复杂程度是一般系统工程所没有的。¹⁸

这里所说的社会工程就是社会系统工程。社会系统工程是组织管理社会系统,以使四大领域、九个方面协调发展并取得长期的和最好的整体效益的工程技术,也是一项复杂的社会技术。

在总结我国50多年社会主义建设的经验和教训之后,今天人们终于认识到中国社会主义建设是一项巨大和极为复杂的社会系统工程,改革开放也是一项庞大复杂的社会系统工程。改革开放以来,我们取得了巨大成就,但也出现过“一手硬,一手软”的问题,经济、教育、科技文化和政治体制改革还不配套,部门之间还不协调等等,都说明改革开放需要社会系统工程。所以,社会系统工程绝不仅仅是个概念问题,它对我国的改革开放和社会主义现代化建设具有重要的现实意义。

9.4 从定性到定量综合集成方法

80年代末,钱学森明确提出,处理开放的复杂巨系统的方法论是“从定性到定量综合集成方法”(以下简称综合集成方法),后来又发展到“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的实践形式(以下简称综合集成研讨厅体系)。这套方法论是从整体上研究和解决问题的方法,采取人机结合以人为主的思维方法和研究方式,对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成,达到对整体的定量认识。实践证明,这套方法论在应用中是有效的,而且必将随着应用的发展而不断发展。

9.4.1 综合集成方法的提出

80年代初,结合现代作战模型的研究,钱学森提出处理复杂行为系统的定量方法学。这种定量方法学是半经验半理论的,是科学理论、经验和专家判断力的结合。与此同时,钱学森大力推动系统工程在社会系统中的应用。系统工程在工程中的应用已被实践证明是非常有效的,如美国的“阿波罗”计划,中国的“两弹一星”,都是成功的范例。但用这些方法解决社会系统工程问题显然是不够的。即使像数学这样广泛使用的理论和方法,也遇到严重困难,因为复杂巨系统特别是社会系统无法用现有的数学工具描述出来。“当人们寻求用定量方法学处理复杂行为系统时,容易注重于数学模型的逻辑处理,而忽视数学模型微妙的经验含义或解释。要知道,这样的数学模型,看来‘理论性’很强,其实不免牵强附会,从而脱离真实。与其如此,反不如从建模的一开始就老老实实承认理论不足,而求援于经验判断,让定性的方法与定量的方法结合起来,最后定量。这样的系统建模方法是建模者判断力的增强与扩充,是很重要的。”^[19]

80年代中,在钱学森指导下,系统学讨论班又进行了方法论的探讨,考察了各类复杂巨系统研究的新进展,特别是社会系统、地理系统、人体系统和军事系统4个方面:

- (1) 在社会系统中,为解决宏观经济决策问题,在马宾等经济学家与当时航天部710所的联合研究中,由几百个变量和上千个参数描述的、定性与定量相结合的系统工程技术的应用研究;
- (2) 在地理系统中,用生态系统、环境保护系统以及区域规划等综合探讨地理系统的研究和应用;
- (3) 在人体系统中,把生理学、心理学、西医学、中医学和传统医学等综合起来的研究;
- (4) 在军事系统中,军事对阵系统和现代作战模型的研究。

在对这些研究进展进行提炼、概括和抽象的基础上,80年代末,钱学森提出处理开放的复杂巨系统的方法论是“从定性到定量综合集成方法”(meta-synthesis)。作为一门技术,又称为综合集成技术;作为一门工程,亦可称综合集成工程。

在这些研究中,通常是科学理论、经验知识和专家判断力(专家的知识、智慧和创造力相结合,形成和提出经验性假设,如判断、猜想、方案等)。在自然科学和数学中,这类经验性假设一般是用严密逻辑推理和各种实验手

段来证明其正确与否。这一过程体现了从定性到定量的特点。但它们用到的各种方法用来解决复杂巨系统问题时,由于复杂巨系统跨领域、跨学科、跨层次的特点,这些方法就显得力所不及了。可是我们对经验性假设又不能只停留在思辨和定性描述和议论上,那样还不能从整体上定量回答问题。那么,出路在哪里?现代科学技术以及基于计算机的信息技术的发展,为我们开辟了新的途径,这就是人机结合以人为主的思维方式和研究方式。我们可以根据整个系统的观测资料(统计数据和各种有关的信息资料),建立包括大量数据的系统模型(充分利用现代数学工具和计算机的各种建模方法),而这些模型必须建立在对系统的实际理解和经验上,以保证模型的合理性和精度要求。通过计算机仿真、实验和计算获得定量结果,同时充分利用知识工程和专家系统等人工智能技术、信息技术,以人(专家体系)为主实现人机结合与融合,进行知识的综合集成。这里包括了科学的和经验的的知识、理性和感性的知识、定性和定量的知识,实现从经验到理论、从定性到定量的优化,达到整体的定量认识,从而对经验性假设的正确与否作出明确结论,这样的结论就是现阶段对客观事物认识的科学结论。

这里的人机结合与融合,实际是人脑的信息加工与计算机信息加工的结合与融合。思维科学研究表明,人脑和计算机都能有效处理信息,但两者有很大差别,各有各的优势。人脑思维的一种是逻辑思维,它是定量、微观的信息处理方式;另一种是形象思维,它是定性、宏观的信息处理方式。人的创造性主要来自创造性思维,它是逻辑思维和形象思维的结合,也就是定性与定量、宏观与微观相结合的信息处理方式。今天的计算机技术在逻辑思维方面确实能做很多事情,甚至比人脑做得还好,已有很多科学成就证明了这一点,如数学家吴文俊的定理机器证明。但在形象思维方面,目前的计算机还不能给我们以任何帮助,至于创造思维只能依靠人脑了。以人为主的人机结合是把人脑的优势和机器的优势都能充分发挥出来,优势互补,相辅相成,人帮机,机帮人,和谐地工作在一起。这个人机结合的系统在思维能力和创造性方面,比单纯依靠人(专家)要强,比单纯靠机器就更强,因而具有较强的处理复杂性问题的能力。从这个角度来看,希望靠机器(计算机)来解决复杂性问题的,至少目前是行不通的。圣菲科学家们走了一条人机结合、以机器为主的技术路线,是导致他们困惑的主要原因。

这个方法的实质是把专家体系、数据和信息体系以及计算机体系结合起来,构成一个高度智能化的人机结合系统,这个方法的成功应用,就在于

发挥了这个系统的综合优势、整体优势和智能优势。它能把人的思维、思维的成果、人的经验、知识、智慧以及各种情报、资料和信息等通通集成起来,从多方面定性认识上升到定量认识。按照我国传统说法,把一个复杂事物的各个方面综合起来,达到对整体的认识,称之为“集大成”的智慧,所以钱学森把这个方法称为“大成智慧工程”(meta-synthetic engineering)。

这个方法体现了“精密科学”从定性判断到精密论证的特点,也体现了以形象思维为主的经验判断到以逻辑思维为主的精密定量论证过程。所以,这个方法是走精密科学之路的方法论。它的理论基础是思维科学,方法基础是系统科学与数学,技术基础是以计算机为主的信息技术,哲学基础是实践论和认识论。

需要指出的是,应用这个方法论研究问题时,也可以进行系统分解,在系统总体指导下进行分解,在分解后研究的基础上,再综合集成到整体,实现一加一大于二的涌现,达到从整体上严密解决问题的目的。从这个意义上说,综合集成方法吸收了还原论和整体论的长处,同时也弥补了各自的局限性,它是还原论和整体论的结合。

9.4.2 综合集成方法的特点

综合集成方法作为一种科学方法论,有其自身的特点,它是在现代科学技术发展这个大背景下提出来的。“现代科学技术不单是研究一个个的事物、一个个现象,而是研究这些事物、现象发展变化的过程,研究这些事物相互之间的关系。今天,现代科学技术已经发展成为一个很严密的综合起来的体系,这是现代科学技术的一个很重要的特点。”^[20]第1章曾介绍过钱学森提出的现代科学技术体系结构,这是一个矩阵式结构,从中可以看到人类知识体系由三个层次的知识所构成:(1) 经验知识、感性知识以及不成文的实践感受,即前科学。这部分知识的特点是只知道是什么,还不能回答为什么,尽管如此,这部分知识对于我们是很宝贵的,也要珍惜。而且这类知识经过研究、提炼也将成为科学知识;(2) 科学知识。这类知识的特点是,不仅知道是什么,还能回答为什么。今天,这部分知识已发展成为十一大科学技术部门和三个层次所构成的体系,而且随着科学技术的发展,还会有新的科学技术部门产生。这个体系对于我们尤为可贵,是我们科教兴国的基础力量。(3) 哲学知识。哲学不仅是知识,还是智慧,特别是马克思主义哲学是人类知识的最高概括,也是人类智慧的最高结晶。

现代科学技术体系是一个相互联系、相互影响的有机整体。科学是认

识客观世界的知识和学问,技术是改造客观世界的知识和学问。不同科学技术部门、不同学科、不同领域之间的相互交叉、结合与融合,就能大大增强我们认识世界和改造世界的能力。交叉科学、边缘科学不断地产生,也说明现代科学技术正向着综合和整体化的方向发展。在这个方向上,综合集成方法能发挥其重要作用。

9.4.2.1 信息

知识和智慧的综合集成,开放的复杂巨系统和复杂性研究,通常是跨层次(经验的、科学的、哲学的)、跨学科、跨领域甚至是跨科学技术部门的综合性研究,但这种综合性并不是简单地把这些知识汇集到一起,这样的汇集只能是一种“拼盘”,最好的效果也就是一加一等于二,不会有新知识出现。但综合集成方法可以进行大跨度、大范围、不同层次的综合集成,产生新知识、发现新规律、获得新认识。专家是智慧、知识和信息的载体,特别是专家们还掌握着丰富的经验知识以及不成文的感受。一个专家的知识 and 经验是局部的和片面的,但专家群体所掌握的知识 and 经验就比较全面了。这也说明了为什么在综合集成方法中需要有专家群体,要有知识结构合理的专家体系。另一方面,计算机和计算机网络系统的海量存储能力,也可以存储大量信息和知识,特别是复杂巨系统的观测资料,如各种统计数据、各类信息资料,都可存储在计算机网络系统中,调用起来也很方便。但经验知识和不成文的感受目前还难以进入计算机系统之中。

人类社会发展到今天,信息已是一切活动的基础。但有了信息未必就有了知识,有了知识未必就有了智慧。综合集成方法对信息的综合集成可以获得知识,信息和知识的综合集成可以获得智慧。从这个意义上说,综合集成方法是人机结合的知识与智慧的生产系统,是知识生产力和精神生产力。它使我们由过去完全依靠人脑进行知识生产转变为人脑与电脑相结合的知识生产方式,这是人类的一大进步,也是当前这场信息技术革命对人类社会影响的重要方面。

在社会系统中,对管理与决策问题的研究产生了管理科学与软科学,这些学科具有交叉性和综合性的特点,用于组织管理与决策支持,其对象是决策者或决策机构。很明显,这类研究对决策者或决策机构来说,不仅有信息和知识方面的支持,还要有智慧方面的支持。因此,这类研究不仅有信息和知识的含量,也应有智慧的含量,否则难于为决策者和决策部门起到参谋和咨询作用。从这个角度来看,这些学科的研究和应用可以使用

综合集成方法。

9.4.2.2 综合集成方法的应用

综合集成方法指出了解决复杂巨系统和复杂性问题的过程性以及过程的方向性和反复性。这个过程是从提出问题和形成经验性假设开始。这一步是专家体系所具有的有关科学理论、经验知识和专家判断力、智慧相结合并通过讨论班的研讨方式而形成的,通常是定性的。这样的经验性假设(猜想、判断、方案、思路等)所以是经验性的,是因为还没有经过精密的严格论证,并不是科学结论。从思维科学角度来看,这一步是以形象思维和社会思维为主。在研讨过程中,要充分发扬学术民主,畅所欲言,相互启发,大胆争论,把专家的创造性充分激发出来。精密的严格论证是通过人机结合、人机交互、反复对比、逐次逼近,对经验性假设作出明确结论,如果肯定了经验性假设是对的,这样的结论就是现阶段对客观事物认识的科学结论。如果经验性假设被否定,就需要对经验性假设进行修正,提出新的经验性假设,再重复上述过程。从思维科学角度来说,这一过程是以逻辑思维和辩证思维为主。在这个过程中,要充分应用数学科学、系统科学、控制科学、人工智能、以计算机为主的各种信息技术所提供的各种有效方法和手段,如系统建模、仿真、分析、优化等。近十多年来,这方面有许多新的发展。以系统建模为例,过去用的较多的是数学建模,现在计算机建模越来越受到重视。以规则为基础的计算机建模,能描述的系统更加广泛,如圣菲研究所发展的SWARM 就是这样的软件平台。

下面以社会系统中决策支持研究为例,说明综合集成方法的应用,用图 9.4.1 的框图表示。

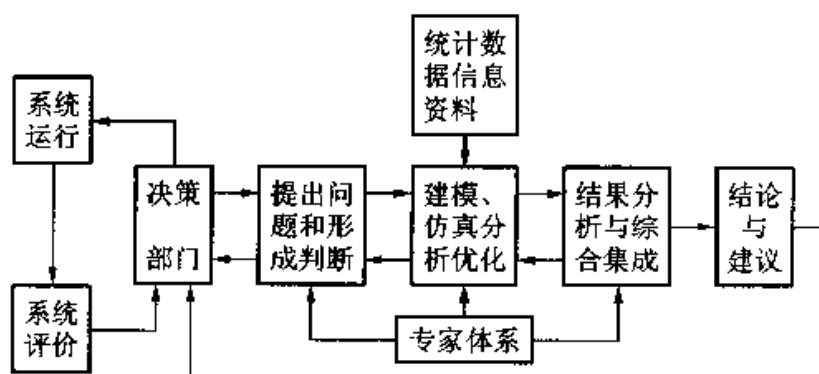


图 9.4.1

其中许多具体细节问题,在第 11 章应用实例中将有详细介绍。

9.5 综合集成研讨厅体系

以计算机、网络、通信为核心的现代信息技术的发展,是一场技术革命,引起经济的社会形态飞跃发展,导致一场新的产业革命,钱学森称之为第五次产业革命。这场产业革命所涌现出来的各种高新技术,为综合集成方法的应用展现了广阔前景。结合系统学理论和人工智能技术的发展,钱学森又提出综合集成研讨厅体系的构想,这是综合集成方法运用的实践形式和组织形式。

9.5.1 综合集成研讨厅体系结构

1992 年,钱学森提出的综合集成研讨厅体系(Hall for Work Shop of Meta-synthetic Engineering,简称 HWSME),是把下列成功的经验汇总和升华了:

- (1) 几十年来世界学术讨论的 seminar 经验;
- (2) 从定性到定量综合集成法;
- (3) C³I 及作战模拟;
- (4) 情报信息技术;
- (5) 人工智能;
- (6) 灵境(Virtual Reality)技术;
- (7) 人机结合的智能系统;
- (8) 系统学;
- (9) 第五次产业革命中的其他技术。

这个研讨厅体系可以看作由三部分组成:以计算机为核心的现代高新技术的集成与融合所构成的机器体系,专家体系,知识体系,其中专家体系和机器体系是知识体系的载体。这三个体系构成高度智能化的人机结合体系,不仅具有知识与信息采集、存储、传递、调用、分析与综合的功能,更重要的是具有产生新知识和智慧的功能,既可用来研究理论问题,又可用来解决实践问题。图 9.5.1 是研讨厅的简单示意图。

建设研讨厅按照分布式交互网络和层次结构组织起来,就成为一种具有纵深层次、横向分布、交互作用的矩阵式研讨厅体系,为解决开放的复杂巨系统问题提供了规范化、结构化的形式。作为一个简单例子,图 9.5.2 绘出了用于作战模拟训练的包含两个层次的研讨厅体系。

这里要指出灵境技术的应用具有重要意义。以上谈到的人机结合,还

是人机优势互补的结合,人与机尚未合一,而由灵境技术开始的这种结合则是融合,是更高层次的人机结合。

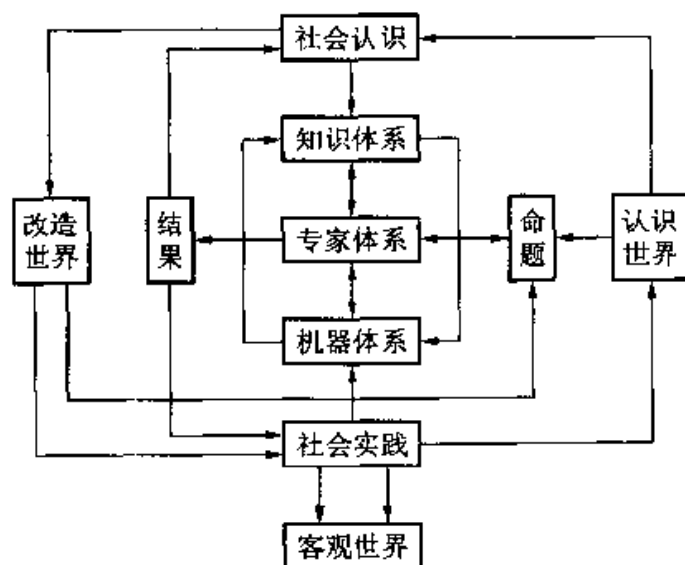


图 9.5.1 研讨厅框图

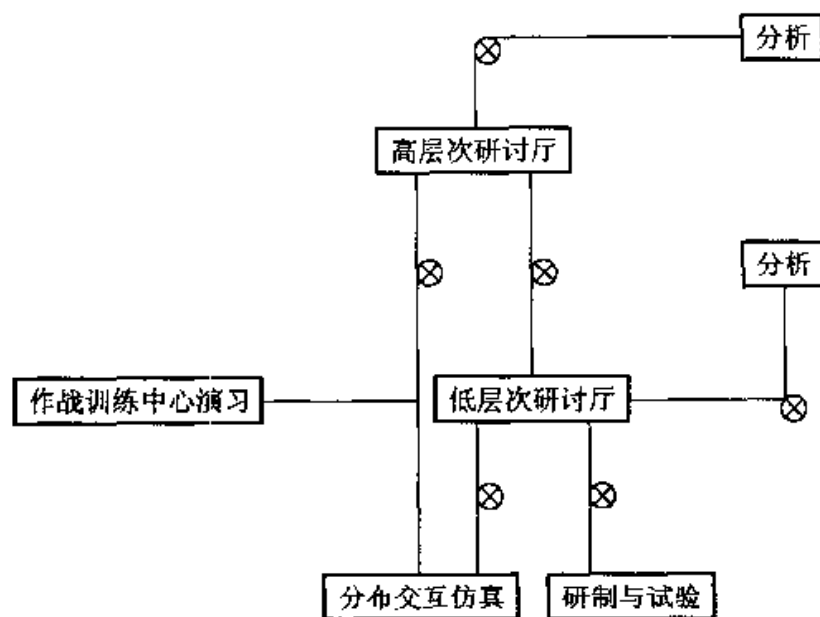


图 9.5.2 研讨厅体系一例

开放的复杂巨系统具有科学与经验的本质,综合集成方法和研讨厅体系实际上是遵循科学和经验相结合、智慧与知识相结合的途径,去研究和解决开放的复杂巨系统问题。从这个角度来看,综合集成研讨厅体系本身就

是个开放的、动态的体系,也是个不断发展和进化的体系。钱学森曾指出:

关于开放的复杂巨系统,由于其开放性和复杂性,我们不能用还原论的办法来处理它,不能像经典统计物理以及由此派生的处理开放的简单巨系统的方法那样来处理,我们必须用依靠宏观观察,只求解决一定时期的发展变化的方法。所以任何一次解答都不可能是一劳永逸的,它只能管一定的时期。过一段时间,宏观情况变了,巨系统成员本身也会有其变化,具体的计算参数及其相互关系都会有变化。因此对开放的复杂巨系统,只能作比较短期的预测计算,过了一定时期,要根据新的宏观观察,对方法作新的调整。²¹

这个思想对综合集成方法的应用,对综合集成研讨厅体系的建设和应用,都有重要指导意义。

9.5.2 总体设计部

应用综合集成方法(包括综合集成研讨厅体系)必须有总体设计部这样的实体机构。如果说综合集成方法是研究开放的复杂巨系统的方法论,那么总体设计部是实现这个方法论所必须的体制和机制,两者是紧密结合在一起的,不同于传统科学研究中的个体研究方式。正如钱学森指出的:

我们把处理开放的复杂巨系统的方法定名为从定性到定量综合集成方法,把应用这个方法的集体称为总体设计部。²²

从应用角度来看,总体设计部由熟悉所研究系统的各个方面专家组成,并由知识面比较宽广的专家负责领导,应用综合集成方法(或综合集成研讨厅体系)对系统进行总体研究。总体设计部设计的是系统的总体方案和实现途径。它把系统作为它所属的更大系统的组成部分来进行研究,对它们所有要求都首先从实现这个更大系统相协调的观点来考虑;总体设计部把系统作为若干分系统有机结合的整体来设计,对每个分系统的要求都首先从实现整个系统相协调的观点来考虑,对分系统之间、分系统与系统之间的关系,都首先从系统总体协调的需要来考虑,进行总体分析、总体论证、总体设计、总体协调、总体规划,提出具有科学性、可行性和可操作性的总体方案。

现在的总体设计部概念是从我国研制“两弹一星”的总体设计部演化过来的,后者对“两弹一星”的研制成功发挥了非常重要的作用。它的实践也证明了这种现代化的系统组织管理和决策支持体制、机制与方法的科学性、可行性和有效性。它不仅适用于工程系统,同时也适用于复杂巨系统,特别是社会系统。当然,在用于社会系统时,总体设计部的理论方法和技术以及

体制和机制都有了很大的实质性发展,不是简单的重复和推广,但它们的功能是相似的。正是从这个角度出发,钱学森曾提出建立社会主义建设总体设计部及其体系的思想,这是关系到决策科学化、民主化、程序化和现代化管理的大问题,是对系统的决策支持体制与机制的一种改革,具有很强的实践性和现实性,同时又有深刻的理论背景以及现代研究方法的科学性,因而受到中央领导的高度评价和充分肯定。^{23,24}

第 10 章 技术科学层次的系统科学

以上各章内容基本属于系统科学中的基础理论。本章对系统科学的技术科学层次作概要介绍。

10.1 引言

技术科学研究的问题来自工程实践。钱学森认为:“技术科学的目的是把工程实际中所用的许多设计原则加以整理与总结,使之成为理论,因而也就把工程实际的各个不同领域的共同性显示出来,而且也有力地说明一些基本概念的重大作用。”¹就系统科学而言,所谓工程实际问题无非是系统的设计研制、系统的组织管理和系统的操作使用。在系统学观点、原理和方法的指导下,把这些工程实践中广泛使用的设计原则、管理原则、操作原则加以整理和总结,揭示出它们的共性,同时进一步说明系统学基本概念的重大作用,这样的理论就是技术科学层次的系统科学,亦即系统科学的应用理论。

从系统观点看,撇开各种具体系统的特殊性问题,系统的设计研制、组织管理和操作使用的共性问题大体可以归结为通信(包括信息处理和信息传递)、控制和运筹决策三大类。在系统学原理指导下对通信工程、控制工程、经营管理活动的实践经验加以理论总结,用系统观点和方法阐述通信、控制、运筹决策以及由它们引出的其他概念的重大作用,制定分析通信、控制和运筹决策进而引出综合设计系统的一般理论框架,就是技术层次的系统科学。简言之,这里要讨论的是信息论、控制论、运筹学。

在第 3~9 章中,我们主要讨论的是系统的运行演化,很少提及系统的功能、效益、用途等问题。但在技术科学层次上,关心的首要问题是系统的功能、效益和用途。在基础科学层次上,我们只考虑系统运行演化的客观规律。在技术科学层次上,重在运用这些规律解决实际问题。控制理论家认为,控制理论研究的主要兴趣在于研究系统为实现某个目的所具有的能力以及如何施加控制来达到这一目的。这同样适用于信息理论和运筹决策理论。这一特点决定了技术科学层次的系统理论中包含大量反映能动性的概念,如可编码、可控制、可观测、可行解、最优策略等。但任何系统的设计、管

理、运筹决策都是在给定的限制条件下进行的,人不能超越这种限制任意发挥主观能动性。虽然对系统所施加的限制条件随着科学技术的发展而在变化,过去不可能的做法未来不一定仍然是不可能的,但到那时新的限制又会出现,使得任何时候的系统设计、管理、决策都存在限制条件。因此,技术科学层次的系统理论都是关于在一定限制条件下发挥能动性的科学理论。

建设、使用通信系统和控制系统,一切实践过程的运筹决策,都是人们的办事活动。把要办的事情办成办好,而且要办得最好,是人类行为之常理。把这个朴素的原则用现代科学语言表述出来,叫做最优性原理。通信系统,控制系统,经营管理社会系统,都存在性能优劣、效益高低的差别。追求优化是人的主观能动性的集中体现,优化思想是系统思想在技术科学中的突出表现。

为达到最优化目的、根据最优化理论制定的各种解决具体问题的方法,称为最优化方法。不同类型的最优化问题有不同的最优化方法,需要具体问题具体解决。

最优化理论和方法是建立在完全理性和信息完备性假设之上的,这两个假设只对比较简单的系统才近似成立。对于比较复杂的系统,优与劣只能相对地区分,最优解已没有意义,实际能得到的往往只是次优或较优解,甚至只能是所谓“满意解”。那种不顾问题的实际背景、单纯追求数学模型漂亮和没有实际意义的最优解的做法,有违系统科学的科学精神。特别是面对开放的复杂巨系统问题时,更要防止这种形式主义,坚持按照从定性到定量综合集成的方法论思想处理问题。

10.2 控制论

10.2.1 控制问题

撇开具体内容看,凡控制总要涉及施控者和受控者两种实体,控制是施控者影响和支配受控者的行为过程,一种有目的的活动,如图 10.2.1 所示。受控对象必有多种可能行为状态,有些合乎目的,有些不合乎目的,由此规定了控制的必要性:追求和保持那些合目的状态,避免或消除那些不合目的状态。只有一种可能状态的对象,则无控制的必要。控制是施控者的主动行为,施控者应有多种可供选择的手段,不同手段作用于对象的效果不同,由此规定了控制的可能性:选择适当的手段作用于对象。只有一种手段的主体,实际上没有施加控制的可能。所以,控制就是施控者选择适当的控

制手段作用于受控者,以期引起受控者行为状态发生合目的的变化。一切从这个意义上提出的问题,不论自然的、社会的或人工制造物的,都是具有“控制意义”的问题,即控制问题。

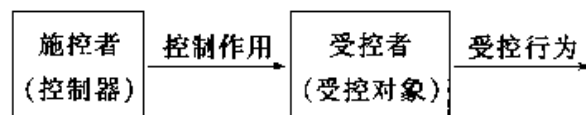


图 10.2.1

控制是系统建立、维持、提高自身有序性的手段。凡系统总需要对其组分进行某种调节控制。在物质世界的进化史中,低级的系统没有专门负责对各组分和整体的行为进行调节控制的子系统,必要的调节功能是通过组分之间动态的相互作用和边界的限制来实现的,贝塔朗非称其为初级调节。物质世界沿着逐步复杂化的方向演化到达一定阶段,仅靠初级调节不能满足复杂系统的需要,开始分化出专门负责对组分和整个系统进行调节控制的子系统,贝塔朗非称其为二级调节。在后续的进化中,出现越来越高级的控制方式,包括生命机体中的控制,社会系统的控制,以及各种人造的自动控制系统。

除了自然界进化中产生的控制外,只要人们可以发挥主观能动性,选择一定的手段去作用于对象,使其达到预定的目标,就构成控制问题。从系统科学观点看,人类改造客观世界的实践活动的核心就是控制。广义的控制包括领导、指挥、支配、经营、管理、创作、设计、组建、制造、操纵、制裁、教育、调节、补偿、决策、优化等等。狭义地说,控制仅指有控制的系统中施控者选择一定手段作用于受控者的主动行为过程。认识客观存在的控制系统,设计和使用人造的控制系统,都需要一套特有的概念、原理和方法。系统地提供这种概念、原理和方法的学问,就是控制论(学)。

控制与信息密不可分。实施控制的前提条件是获取受控对象运行状态、环境状况、实际控制效果等信息,控制目标和手段都是以信息形式表现并发挥作用的。控制过程是不断获取、处理、选择、传送、利用信息的过程。所以,维纳强调:“控制工程的问题和通信工程的问题是不能区分开来的,而且,这些问题的关键并不是环绕着电工技术,而是环绕着更为基本的消息概念,而不论这消息是由电的、机械的或神经的方式传递的。”²

能够全面获得内部信息的系统,称为白箱。只有部分内部信息可以获得

的系统,称为灰箱。内部信息完全不掌握的系统,称为黑箱。按获得信息的程度把对象分为白箱、灰箱和黑箱,是系统科学的又一种完备系统分类。相应地,系统科学提出处理系统控制问题的白箱方法、灰箱方法和黑箱方法。

10.2.2 控制任务

控制系统是人们为完成一定的控制任务而设计制造的。具体系统的控制任务千差万别,但从系统观点看,主要有以下几种类型的控制任务。

(1) 定值控制 在某些控制问题中,控制任务是使受控量 y 稳定地保持在预定的常数值 y_0 上,称为定值控制。实际存在的干扰因素使 y 偏离 y_0 ,控制系统的任务是克服或“镇压”干扰的破坏作用,使系统尽快恢复原状态,故又称为镇定控制。实际控制过程并不要求严格保持 $y = y_0$,只要求 y 对 y_0 的偏差 $\Delta y = y - y_0$ 不超过许可范围即可。

定值控制是最简单的控制任务,在自然界、生命机体、社会和机器系统中广泛存在。如人的体温和血压控制,导弹巡航速度(马赫数 M 等)控制,室温控制,供电系统电压和频率控制,国民经济发展指标的控制等。

(2) 程序控制 当控制任务是保证受控制量 y 按照某个预先知道的方式 $\varphi(t)$ 随时间 t 而变化时,应当采取程序控制。 $\varphi(t)$ 的形式应能够预先精确确定,并表示为一定的程序。程序控制的任务就是执行这个预定的程序,保证使 $y = \varphi(t)$ 。定值控制是 $\varphi(t) = C$ (常数)时的特殊程序控制。

程序控制也广泛存在。在工程技术领域,时钟的转动,程控机床的运行,要靠程序控制。在生命领域,生物个体从卵细胞开始的发育过程,昆虫的变态,生物钟的运行,要靠程序控制。在社会领域,大至国家执行五年计划,小至学校执行教学计划,个人按照日程安排处理事务,都是程序控制。

在结构上,程序控制的特点是有程序机构,把受控量预定的变化规律 $\varphi(t)$ 表示为程序,储存于专门的程序机构中。在系统运行过程中由程序机构给出控制指令,由控制器执行指令,保证受控量按照程序变化。

(3) 随动控制 在许多情况下,控制任务既不是使受控量保持不变,也不是使它按照预定的规律变化,而是随着某个预先不能确定的规律变化。受控量 $y(t)$ 是时间 t 的函数,要求按照某个只能在系统运行过程中实时测定的变化规律 $u(t)$ 来变化。这时的控制任务是保证 y 随着 u 的变动而变动,故称为随动控制。又称为跟踪控制,因为控制任务是使受控量 $y(t)$ 尽可能准确地跟踪外部变量 $u(t)$ 的变化,直至达到目标。

随动控制极为普遍。火炮控制,雷达天线控制,猎人对猎枪的控制,都

是随动控制。体育竞赛中人体呼吸的节奏和深度需要跟踪身体用力状况的变化而变化,产品跟踪市场的波动而波动,也是随动控制。最典型的是导弹为击中机动目标的控制,不断地监测目标的位置和速度,不断地调整导弹的飞行路线,逐步缩小差距,直到最后击中目标。

(4) 最优控制 定值控制、程序控制和随动控制的控制任务可以统一表述为:保证系统的受控量和预定要求相符合。三者的区别在于,这种预定要求是固定的还是可变的,变化规律是预先精确知道的还是只能在运行过程中实时监测。但是,许多实际过程关于受控量的预定要求不仅不能作为固定值在系统中标定出来,或者作为已知规律引入系统作为程序,甚至无法在系统运行中实时获取。这类过程的控制任务应当表述为:使系统的某种性能达到最优,即实现对系统的最优控制。令 G 代表控制工程师所关心的系统性能指标或效益, J 为有效性判据。最优控制的控制任务是:寻找并实现这样一个或一组控制变量,它们满足加在系统上的限制,又能保证系统获得最佳的效益,即 $J = G = \text{最好(最大或最小)}$ 。

最优控制的实例也很广泛。例如,发电站保证发电机最大效益的控制,宇航系统要求达到预定位置所需时间最小的控制,经济系统对有限资源最优分配的控制等。

不同受控过程要求不同的控制思想。实际应用中,常常将不同控制任务的系统结合使用。同一飞行器常常既有定值控制,又有程序控制和随动控制。人体系统,社会系统,都同时具有执行 4 种控制任务的控制系统。

10.2.3 控制方式

给定控制任务后,还需要选择适当的控制方式或策略。控制是一种策略性行为,同一任务可以采用不同的控制策略加以实现,形成不同的控制方式。有以下几种基本控制方式。

(1) 简单控制 如图 10.2.2 所示,根据实际需求和对于受控对象在控制作用下的可能结果的认识,制定适当的控制方案或指令,去作用于对象以实现控制目标。例如,根据市场需求和工厂历来的行为特点,厂领导制定生产计划即控制作用,下达给车间执行。

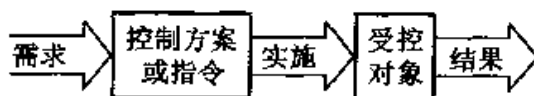


图 10.2.2 简单控制

这种控制策略的特点是“只下达命令,不检查执行结果”。它的有效性依赖于对控制方案的科学性和对象忠实执行命令的品质的完全信任,以及假定外部干扰可以忽略不计。优点是结构简单,操作方便。由于控制过程中信息流通是单向的,又称为开环控制。

(2) 补偿控制 在许多情形下,外界对系统的干扰不能忽略不计,即使对象能忠实地执行控制指令,干扰的存在也会使控制作用无法达到预定要求。必须着眼于消除或减少干扰的影响来制定控制策略。一种可行的策略是“防患于未然”,即在干扰给系统造成影响之前,能够预测干扰作用的性质和程度,计算和制定出足以抵消干扰影响的控制作用,并施加于受控对象。例如,流行病发生初期打预防针,一项工作开始时做思想工作,都是补偿控制策略。图 10.2.3 示意了这种控制策略。

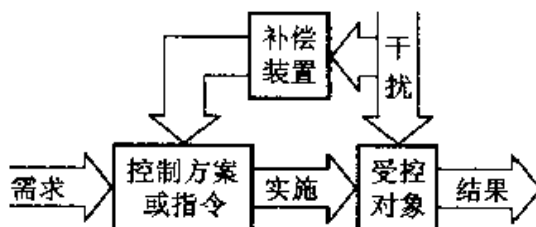


图 10.2.3 补偿控制

为了事先抵消干扰的影响,需要设置补偿装置,借助它监测干扰因素,把它量化,并准确地反映在控制计划中,通过执行这种控制计划,使得系统在干扰引起严重偏离之前就能抵消掉它的影响,因而称为补偿控制。根据系统工作过程中信息流通的特点,又称为顺馈控制。补偿控制原则上也是开环控制。

(3) 反馈控制 由于干扰因素的性质和数量千差万别,所需要的补偿方案也千差万别,相应的补偿技术常常是很复杂的。补偿的前提是精确了解干扰的性质和大小,这往往做不到。即使能够精确测定,如果干扰作用过强,事实上无法补偿掉。何况补偿控制同样以信任对象能够忠实执行控制指令为前提,这在许多情形下(特别是以人和人群为对象的控制问题)做不到。这就需要采取反馈控制策略。这种控制策略不着眼于预先抵消干扰的影响,而着眼于实时监测受控对象在干扰影响下的行为表现,把它量化,并与控制任务要求的目标值(需求值)相比较,形成误差,根据误差的性质和程度制定控制方案、施加控制作用,以便消除误差,达到控制目标。这种以误

差消除误差的控制策略,常称为误差控制。如图 10.2.4 所示,其中的上半部相当于简单控制,控制作用产生一个结果,这个结果与干扰造成的结果被一道测量,通过下半部线路反向送回输入端(即反馈),与目标值进行比较,形成误差,根据误差确定新的控制作用。如此反复施加控制作用,反复测量控制结果,反复回馈结果信息,反复修改控制作用,直到误差消除为止。在结构上,需设置反馈信息的环节和通道,因而称为反馈控制。鉴于信息流通形成了闭合环路,又称为闭环控制。

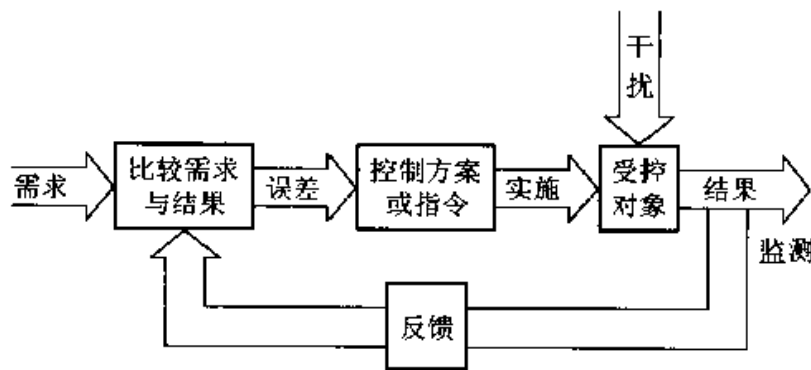


图 10.2.4 反馈控制

反馈代表一种控制原理,一种控制技术。总的来说,反馈控制是最有效的控制策略,获得广泛应用。当存在模型不确定性和不可测量的扰动时,反馈控制能够实现较高的品质要求。在演化系统的控制中,反馈更具有基本的重要性。

(4) 递阶控制 早期的控制系统都是中小规模的,采用单一控制中心,一切信息都汇集在这里进行处理,一切控制指令都从这里发出,称为集中控制。单一中心的集中控制方式不适用于大系统,如大型工业企业、大电力网、交通网、城市管理系统等。大系统不仅规模大,而且一般是分散的(子系统分布于广阔的空间范围,信息分散),具有不确定性(随机性、模糊性),数学模型往往是高维、高阶的,系统中常常包含人的因素。有些大系统可以采用分散控制方式,把系统分为若干片,每片设置一个控制中心,各自独立地控制,彼此互不协调,如城市交通指挥。

大系统的通用控制方式是集中与分散相结合的递阶控制。递阶控制的一种方式是多级控制。按照受控对象或过程的结构特性和决策控制权力把大系统划分为若干等级,每个等级划分为若干小系统,每个小系统有一个控制中心,同一级的不同控制中心独立地控制大系统的一个部分,下一级的控

制中心接受上一级控制中心的指令。控制过程中信息流通主要是上下级之间的信息传递。图 10.2.5 示意的是一个三级递阶控制的大系统。

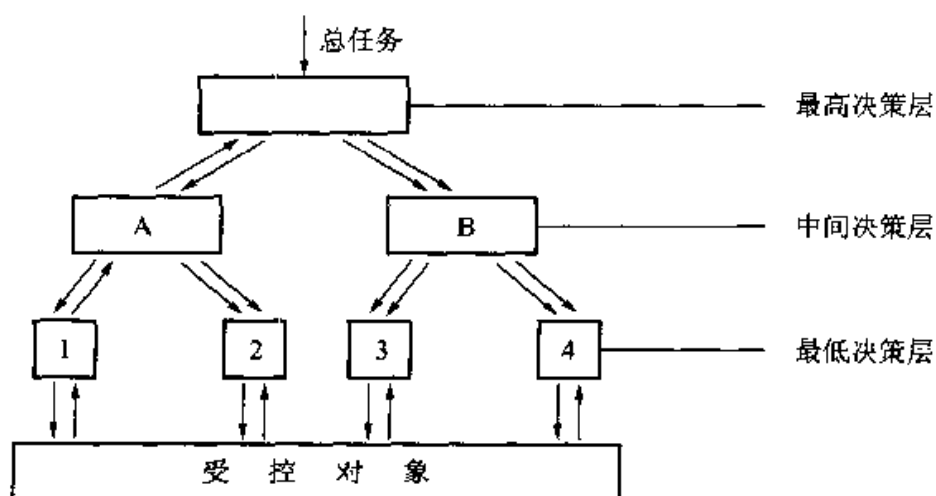


图 10.2.5 三级递阶控制

递阶控制的另一种方式是多段控制。按照受控过程的时间顺序把全过程划分为若干阶段,每个阶段构成一个小控制问题,采用单中心控制,再按各段之间的衔接条件进行协调控制。图 10.2.6 示意的是一个三段递阶控制的大系统。

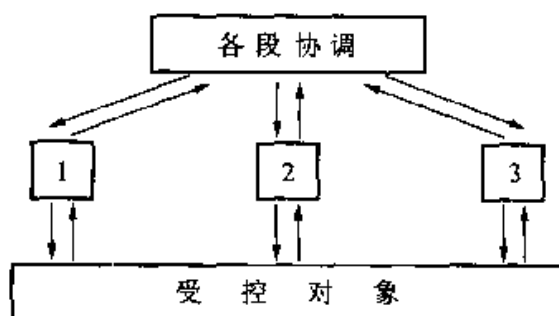


图 10.2.6 三段递阶控制

10.2.4 控制系统

控制是一种系统现象,一种系统行为。任何控制问题都是根据受控对象的需要而提出来的,任何受控对象都是某种系统,有自己特有的结构、特性、功能和运行规律。控制规律的选择,控制方案的制定,都建立在关于控制对象作为系统的组分、结构、特性、运行规律的深刻理解基础上。施控者或控制器本身也是系统,是由多个具有不同功能特性的环节按照特定方式

耦合而成的系统。控制器与受控对象又按照一定的方式连接起来形成完整的控制系统。所以,必须从系统观点来提出控制问题,把控制作为一种系统行为来分析,用系统观点和方法解决问题。控制论就是系统控制理论。

作为一类特殊系统,控制系统的涌现性集中表现于它的功能。要获得这种特性,必须具有全部必要的基本环节,并把它们按照特定的结构耦合或组装成为一个整体,元件、环节、部件的总和不具备这种功能。控制系统的整体涌现性表现于许多方面,如局部优化不等于整体优化(每个元件都最优的系统,整体未必最优),局部(元件)可靠不等于整体可靠,局部稳定不等于整体稳定,等等。冯·诺伊曼最先提出的“重复使用大量不那么可靠的元件,可以构造成高度可靠的系统”的著名命题,就是对整体涌现性的一种刻画,是控制论的重要原理。

控制系统都是开放的,描述系统与环境相互关系的基本概念是输入和输出。环境对系统的一切影响都归结为输入,系统的边界都承受环境的作用。为简便计,假定系统具有固定的输入端,环境对系统的所有输入都出现在这里。输入作用以输入变量表示,只有一个输入变量的是单输入系统,同时存在多个输入变量的是多输入系统。系统对环境的各种影响和作用可能出现在于边界的任一点。为简化描述,假定系统具有固定的输出端,系统对环境的一切输出都发生于这里。输出作用以输出变量表示,只有一个输出变量的是单输出系统,同时存在多个输出变量的是多输出系统。令 u 记输入变量, y 记输出变量,控制系统常用以下方框图表示:

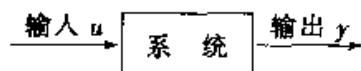


图 10.2.7

按照实施控制过程中是否有人参与,把控制系统分为两类。无需人力直接参与而能独立地、自动地完成某种特定任务的受控工程系统,称为自动控制系统。通过人力操作机器来实施控制的是人工控制系统。

研究、设计、使用控制系统必须考虑环境问题。最简单的控制系统必须有从外部输入的控制作用,向外部提供的输出作用,还要考虑干扰因素。一般控制系统对工作环境都有所要求,如环境温度、振动条件等。复杂的控制系统需要更多的考虑环境因素,如多变环境中的适应性控制,系统在环境中学习的自组织控制等。从控制论的发展趋势看,环境问题越来越受到重视。

控制器的基本的功能环节有:负责获取信息的敏感环节;负责处理信

息、制定控制指令的决策环节(工程系统的决策过程一般较为简单,主要内容是对受控量与控制量进行比较,常称为比较环节);负责执行控制作用的执行环节;负责回馈信息的反馈环节;各种中介环节,如放大环节(把比较环节输出的微弱信号放大到能够驱动执行环节)和校正环节(其功能是改善系统的动态品质)等,它们都是控制系统的子系统。控制系统的基本结构如图10.2.8所示:

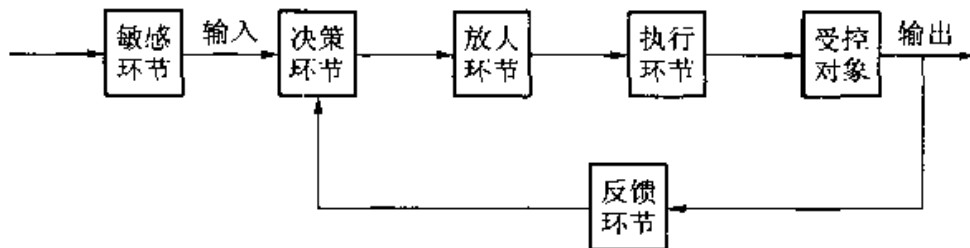


图 10.2.8

控制系统一般都是动态的,从施加控制作用起到实现控制目标止,要经历一个动态过程。经典控制理论把输出对输入的响应作为动态过程来描述,现代控制理论把系统状态对输入作用和干扰作用的响应作为动态过程来描述。即使开放的复杂巨系统的控制问题,根据钱学森的复杂性定义,同样需要考虑动力学问题。正因为如此,在技术科学层次上的各门系统理论中,控制论与系统学的关系最密切。本书第3~7章的内容在控制理论中有广泛的应用。

无论是分析还是综合,都需要对系统的性能作出评价。其中既有结构特性,也有动态特性;既有定性特性,也有定量特性。除了稳定性和过渡过程特性,以下几种特性对于研究和设计控制系统也是必须考虑的。

(1) 可控性 控制器施加一定的控制作用于对象,是为了使对象系统的状态发生合目的变化。可能有这样的控制器,无论它采取什么手段,都不能使受控对象发生合目的变化。从控制的角度看,研制控制系统的基本要求之一是使系统具有改变各种状态的能力,即具有可控性。医生治病是一种控制,病人是受控对象,手术、打针、服药等是控制手段,目的是把人体系统从疾病态调整到健康态。有些病可以治好,有些病被视为不治之症,就是可控性问题。一般地说,如果在一个有限时间间隔内存在一个控制作用,使系统能够从某个初态到达合目的的预定状态,就说这个初态是可控的;否则,称这个初态是不可控的。当系统的所有可能初态都可控时,就称这个系

统是完全可控的。

(2) 可观测性 实施控制的前提是获取系统的信息,特别是状态信息。状态信息一般不可能直接测量,需要借助输入和输出信息来确定,由于输入是已知的,关键是获取输出信息以确定状态信息。一个好的控制系统必须能够了解每一时刻的系统状态。但有了输入和输出信息,并不必然就可以获得状态信息。所谓系统的可观测性,是指由测量输出来决定系统状态特征的能力。医生根据体温、血压或脉搏、舌苔等输出信息,对许多疾病可以做出确诊,但对有些疾病又常常无法确诊,这就是人体系统的可观测性问题。一般地说,如果根据输出信息能够确定某个初始状态 $X(0)$,就说这个状态是可观测的;如果所有的初始状态都可观测,就说系统是完全可以观测的。

(3) 鲁棒性 由于测量的不精确和运行中受环境因素的影响,不可避免要引起系统特性或参数缓慢而不规则的漂移,称为系统特性或参数的摄动。控制系统品质指标对这些特性或参数摄动的不敏感性,即在出现摄动时品质指标保持不变的特性,称为鲁棒性。通俗地讲,就是系统的强壮性,经得起摔打。各种类型控制系统的设计都要考虑鲁棒性问题。

(4) 控制精度 控制过程完成后受控量的实际稳态值与预定值之间的差,称为控制精度。控制精度是衡量控制系统性能优劣高低的重要品质指标。因控制任务的不同,对控制精度的要求可能显著不同。系统的控制精度与系统的经济性、简便性等往往有矛盾,必须统筹考虑,力求多种品质指标综合最优。

10.2.5 建模与辨识

研究控制系统,包括系统分析和系统综合,都需要有数学模型。关于系统分析和系统综合的概念、原理和方法的讨论,构成控制论的基本内容。系统分析的任务是研究它的组分、结构、功能、可能的行为及控制方式等。分析系统是为了选择适当的结构方案,确定有关参数,即进行系统综合。由于控制系统是典型的动态系统,第3~9章介绍的系统原理和方法广泛地应用于系统分析和系统综合。

10.2.5.1 建模

早期的工程控制系统都是简单的物理系统,根据力学的或电磁学的基本原理可以建立系统的数学模型。从输入—输出观点看,简单工程控制系统一般都可以划分为6类基本环节:非周期性环节,振荡环节,积分环节,放

大环节,一阶微分环节,二阶微分环节。同类环节具有共同的数学本质,数学模型最复杂的不过是二阶常微分方程,反映该环节的输出变量如何动态地响应输入变量。有了各个环节的动力学方程,再按照它们在系统中的耦合方式,即可写出整个系统的运动方程。钱学森把这种建模方法称为直接综合法。

同前面几章相比,控制论研究的系统一定要有输入和输出,控制问题可以表述为选择适当的输入以得到预期的输出。输入—输出观点对解决控制问题有基本的重要性,贯穿于控制论对系统的各种定义中。简单的控制系统只需从输入—输出观点来研究,主要关心的是输出对输入的动态响应,不大在意系统的内部物理过程。基本数学模型是传递函数,即把系统看作一种信息的变换、传递装置,输入信息经过系统的变换和传递而成为输出信息,用适当的数学形式把这种变换、传递作用表示出来,就是系统的数学模型。

单纯就输入—输出关系对系统进行分析和综合,称为黑箱方法。一个物体或系统如果无法或不允许打开,不能获取有关其内部结构、机制、状态的信息,就被称为黑箱。被当作黑箱的对象并非不可研究和控制。黑箱也有其外部特征和参数可供观测,利用它们可以对系统的内部特性有所了解。输入和输出就是这种外部信息。凡是不把对象分解为组成部分,不是从研究内部结构和机制入手去了解系统,而是通过外部观察和试验,输入一定的激励作用,测量所产生的输出响应,通过对输出信息的分析来了解系统特性,找出排除故障、实施控制的途径,都称为黑箱方法。

随着对象复杂性的增加,如化工过程控制、航天系统控制等,单纯输入—输出方法不能满足要求,基于系统内部状态的信息来制定控制方案的要求提出来了。现代控制理论强调了解系统的内部状态,把对象看作白箱,倡导用状态空间方法描述系统,即以状态方程和输出方程为数学模型:

$$\dot{x} = f(x, u, \lambda) \quad (\text{状态方程}) \quad (10.2.1)$$

$$y = g(x, u, \mu) \quad (\text{输出方程}) \quad (10.2.2)$$

其中, u 为输入(控制)变量, x 为状态变量, y 为输出变量, λ 、 μ 为控制参量, f 、 g 的数学形式就是模型的数学结构。这种建模方法仍然是直接综合。

10.2.5.2 辨识

当无法从基本科学原理出发建立系统模型时,就需要采用系统辨识的方法。系统辨识的目标是建立描述控制系统动态特性的数学模型,例如状

态空间描述;根据是由观测和实验得到的关于输入、输出的数据资料,以及关于系统的某些已有的知识(称为先验知识)。从这些数据和知识中提取信息,确定数学模型的结构和有关参数,这种操作过程就是系统辨识。首先是结构辨识,选择模型的数学形式,如方程的类型和阶数;然后估计模型中的参数,称为参数估计。系统辨识不可能一次完成,需要反复进行实验观测,反复选择模型结构,反复估计参数,反复进行检验,直到比较满意为止。图 10.2.9 给出辨识过程的基本结构。

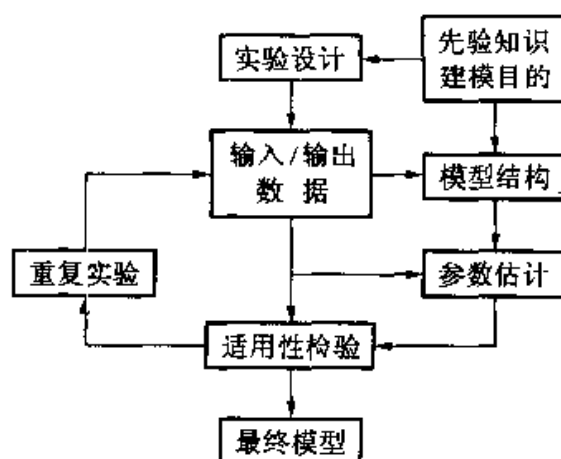


图 10.2.9

系统辨识理论和技术的发展表明,随着控制问题复杂性的增加,控制界对理论描述的严格化、精确化要求已开始降低,更加重视从对象的实际出发。对系统辨识的概念和技术已相当明显地体现出认识与实践的辩证关系。当对象是开放的复杂巨系统时,一般系统辨识方法也难以奏效,需应用从定性到定量综合集成方法。

10.2.6 控制论面临的挑战

对控制问题进行理论研究,肇始于 1868 年麦克斯韦(J. C. Maxwell)以微分方程为工具分析蒸汽机调速器稳定性的工作,到维纳的《控制论》(Cybernetics)一书问世(1948)才发展为一门现代科学理论。维纳著作中包含许多深刻的科学思想、系统思想和哲学观点,但可操作的东西不多。钱学森以维纳著作所阐明的控制原理为依据,总结控制科学界在工程实践和理论研究中的成果,写成《工程控制论》(1954),被译为多种文字。以此为起点,卡尔曼(R. E. Kalman)等一批学者在 60 年代运用微分方程论、线性代数、概率论等现代数学工具对线性控制系统做了透彻的研究,形成所谓控制理论

(Control Theory),或称现代控制论,不仅理论上十分漂亮,而且在工程实践上获得空前的成功。以至于在近几十年中,搞控制研究的人为避免误会,常称自己搞的是 Control Theory,而不是 Cybernetics。

控制科学的成功,诱使人们把它的原理和方法推广应用于越来越大型复杂的系统。70年代提出大系统控制论,但因缺乏适当的数学工具和新的控制思想,至今未建立可以同控制理论相媲美的理论体系。80年代以来,一方面,由于航天事业和大型复杂生产过程管理等方面的需要,控制工程实践中提出大量非线性控制、鲁棒性控制、柔性结构控制、离散事件系统控制等复杂问题,是现有控制理论难以解决的。复杂系统的控制理论将成为未来控制理论的一个主攻方向。实际的发展促使学者们重新认识 Cybernetics 的价值,发现维纳的原始思想可能蕴藏着解决复杂控制问题的宝贵启示。控制论和控制理论的界限变得模糊了。或者说,作为技术科学的控制论迫切需要系统学的指导。另一方面,混沌理论、自组织理论、非线性科学的出现,不仅提出许多新的复杂而困难的控制要求,同时也提供了十分新颖的系统思想和原理,需要也可能提出新的控制思路和方法。这些进展使控制科学面临重大的新挑战,同时也是取得新的大发展的机遇。

另一条发展途径是把控制论基本原理应用于生物、神经、经济、社会等领域,产生了生物控制论、神经控制论、经济控制论、社会控制论等边缘学科。其中,成果显著的是生物控制论和经济控制论,把现代控制论的方法应用于生物机体和经济运行的控制问题,得到许多定量分析的结果。然而,现代控制论主要是线性系统理论,生物、经济等系统本质上是非线性的,以线性模型描述它们的有效性颇受怀疑。社会控制论基本停留在概念分析层面上,且主要是讨论社会制度的设计问题,很少使用控制科学的基本原理和方法。这里遇到的本质困难在于生物、社会都属于开放的复杂巨系统,它们的控制问题同样不能使用从简单系统控制问题中概括出来的控制理论来解决,有待从新兴的复杂性科学中吸取新的控制思想和方法。³

10.3 运筹学

10.3.1 从物理到事理

作为科学研究对象的客观世界是由物和事两方面组成的。物指独立于人的意识而存在的物质客体;事指人们变革自然和社会的各种有目的的活动,包括对自然物的采集、加工、改造,人与人的交往、合作、竞争,对人的活

动所做的组织、协调、管理等。通俗地讲,事就是人们做事、搞工作、处理事务。

人类的知识由关于物的知识和关于事的知识两部分组成。通俗地讲,物理是物质运动之理,事理是办成办好事情之理。随着近代文明的兴起和发展,关于物的知识首先获得科学的形态,产生了自然科学。自然科学创造了一整套方法,把人在实践中对自然界的影响撇开,单就实践的物质对象的自然属性进行研究。自然科学是关于物理的科学,即广义的物理学。关于事的知识或事理则长期停留在经验知识的形态,人们只能靠经验和艺术办事。

从20世纪开始,由于大工业、大生产、大企业的大量出现,单靠经验知识已无法搞好经营管理,产生了使关于事的知识也取得科学形态的客观需求。从那时起,科学家开始应用自然科学行之有效的方法研究某些事理问题,取得不少成果。特别是第二次世界大战期间,战争的需要推动人们研究如何合理地或优化地使用现有武器系统、如何搜索敌机敌舰等事理问题,形成军事运筹学这个与自然科学性质不同的新学科。这些成果战后被迅速推广应用于经济、社会等问题,正式产生了运筹学。又经过几十年的发展,人们对于这个本质上不同于自然科学的研究领域有了深刻的认识。在西方,西蒙提出关于人工事物的科学;在中国,许国志、钱学森等于1980年前后提出事理和事理学的概念,明确了“物有常规,事有定则”,钱学森于90年代进一步提出区分运筹学和事理学的设想。

在系统科学的三门技术科学中,运筹学与自然科学的技术科学之间的区别最显著。就研究对象看,自然科学中的技术科学完全撇开人的活动,仅仅研究自然现象,研究物质运动和能量转换;运筹学则撇开物质运动和能量转换,研究人的活动这种社会现象,即人们基于一定物质条件的办事过程。就研究成果看,自然科学中的技术科学提供的是问题的答案,运筹学提供的是活动的策略。就使用的数学工具看,虽然都是应用数学,但前者处处体现着物理学的痕迹,如场论、势论、波动方程、散度、旋度等;解决运筹问题的应用数学大量引入人类活动的词汇,如合作、竞争、联盟、顾客、服务、库存、策略等。运筹学的出现从一个侧面有力地表明,科学作为一种演化系统正处于深刻的形态转变之中。

10.3.2 运筹问题

在人类的生存活动中,凡需要通过定性谋划和定量计算而制定出行动

方案的问题,都是运筹问题。按照钱学森的观点:“我们的运筹学不包括系统工程的内容,而只包括了系统的特殊数学理论”⁴。因此,典型的运筹问题应是可以用数学语言描述的事理问题。

这样讲仍然过于宽泛。实际的运筹问题五花八门,无法用统一的方式表述它们的具体内涵。运筹学的发展道路是根据实际运筹问题提出一些典型类别,根据各自不同的内涵分别加以表述。不同的运筹问题,形成不同的运筹学分支。这在一定程度上类似理论自然科学把对象分为若干普适类,分别建立各自的理论体系。发现具有运筹意义的问题,是这一学科发展的关键。现已得到充分研究的主要运筹问题有:

(1) 规划问题 大量事理过程由资源(资金、物资、设备、人力、时间、任务等统称为资源)和活动两方面组成,资源是有限的,活动有多项,每项活动都需要多种资源,于是就产生了资源分配问题,不同的分配方案有不同的总效益。设资源集为 $(A_1, A_2, \dots, A_n)$,活动集为 $(B_1, B_2, \dots, B_m)$,分享 n 项资源把 m 项活动相互联系起来,同时为 m 项活动所需要把 n 项资源相互联系起来,形成一个系统整体,为获取最好的总效益,必须用系统观点对所有的资源和活动作统筹安排。这种有限资源的最优分配,就是规划问题。

(2) 排队问题 一类广泛存在的事理运动是由要求服务的一方(称为顾客)和提供服务的一方(称为服务台)相互依存、制约关系构成的。顾客一般是随机到达的,服务台的服务能力有一定限度,于是形成有时顾客为等待服务而排队,有时服务台因没有顾客而空闲。顾客来到服务台(称为输入)有自身的统计特性,排队等待服务须遵守排队规则,服务台提供服务也有一定的服务规则,三者相互关联和制约形成一种特殊的系统。根据每种具体情况下输入、排队和服务的特性,在服务台收益、服务强度和顾客需要(尽量减少排队损失)之间作出合理的安排,就是排队问题。

(3) 对策问题 凡两方或多方为获取某种利益、达到某种目的而进行较量,从而导致优胜劣汰的现象,叫做竞争。参与竞争的各方都是理智的主体,拥有各自的策略集(使用对自己最有利的策略),通过策略较量而分出胜负、输赢的,属于策略性竞争。如何在竞争中通过正确运用策略以赢得竞争,就是对策问题。对策活动可以看成由局中人(拥有策略、参与竞争者)、策略集和得失函数三个要素组成的系统。

(4) 决策问题 行动前从所有可能的行动方案中选择最佳方案的理性活动,称为决策。决策可以看作特殊的对策,一方是“大自然”即环境,虽无

理智但拥有多种作为随机事件出现的可能情形(自然状态),一方是拥有多种策略可供选择的决策人。决策人如何根据自然状态发生的统计规律来选择自己的最优策略,就是决策问题。

(5) 库存问题 无论工厂、企业或公司、商店,为了避免因缺少原料、货物而中断业务,造成缺货损失,必须有储存。储存必须支付储存费用,过多的储存会造成存储损失。这是经营管理中一对常见的矛盾。库存是由需求(存储物的输出)、供应(存储物的输入)、费用和存储策略构成的系统。如何合理解决缺货损失和存储损失的矛盾,寻找最优存储策略,是研究存储问题的中心内容。

(6) 搜索问题 寻找某种位置不明对象的活动,称为搜索。搜索活动是由搜索主体和搜索对象构成的系统。实现搜索目的将获得效益,进行搜索需付出搜索代价,形成一种特殊的矛盾。完成同一搜索任务可以有不同搜索方案(分配搜索手段、组织搜索活动的方式),不同方案在效益和代价上常常不同。根据搜索目标、手段、方案之间的系统关联,综合考虑效益与代价,从总体优化出发制定最佳搜索方案,是研究搜索问题的中心任务。

一切运筹问题都是由目标、条件、决策三者构成的系统。运筹学的任务是正确提出运筹问题,以系统观点分析问题,制定表达目标、条件、决策的数学方法,发明求解运筹问题的算法,寻找在满足限制条件下达到目标的最优决策。

10.3.3 运筹模型

描述运筹问题的数学模型的一般形式为

$$P = \phi(X; C) \quad (10.3.1)$$

其中, P 是运筹系统性能指标或效益的度量,体现系统的功能目标。 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 记决策向量,分量为决策变量 x_j ; $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$ 记控制向量,分量为控制参量 c_i 。适当选择 X 去对付 C 以求获得最优的 P , 就是运筹决策。

给出(10.3.1)的统一数学结构是不可能的,只能针对每种典型运筹问题分别寻找数学结构。在以系统观点给出某类运筹问题的正确表述之后,进一步的工作是选择适当的变量(变元)、参数和数学结构把它表示出来,建立运筹问题的数学模型。欲建立好的模型,不仅需要深刻理解问题的运筹意义,还需有数学的洞见。丹齐格(G. B. Danzig)建立的线性规划模型就是一个典型范例。在他之前,已经发现制定规划或计划是一类重要的运筹问

题,由于未能抓住问题的事理本质,人们把规划问题归结为基于某些优先准则的计算,没有找到表示有关活动之间数量关系的数学形式。丹齐格最先认识到规划问题是关于有限资源的最优分配问题,提出把待解决问题的目标表示为决策变量的函数,称为目标函数,用不等式表示客观条件的制约,称为约束条件,把规划问题统一表述为在满足约束条件下寻求目标函数最优解,终于使制定规划这个事理问题获得了恰当的数学表达形式。

运筹模型分确定型与随机型两大类,每一类又有静态型与动态型的区别。线性规划、非线性规划、整数规划、目标规划等是确定性静态模型的代表,数学工具是代数方程和不等式。目标函数和约束条件全部用线性形式表示的是线性模型,至少有一个非线性表达式的是非线性模型。

静态规划解决的是一次性规划问题,只要办事之前做出的决策是可行的,以后就只是实施的问题,无须再做决策。但许多实际问题所需要的决策不可能在办事之前一次完成,需要把整个办事过程划分为若干时段,在不同时段分别进行阶段性决策,办成一件事的决策是由前后衔接的多个决策构成的决策系列。由于引入时段概念,称为动态规划。它的主要理论根据为贝尔曼(R. Bellman)的最优性原理,这是运筹学的重要理论成果。

运筹问题,或者说一般的事理问题,或多或少都存在随机因素。确定性模型描述的是随机因素可以忽略不计的对象,但大量运筹问题中的随机因素不可忽略,许多问题甚至只有当作随机系统才能把握其本质特性。这需用随机型数学模型,如排队问题、博弈问题、搜索问题等。

以上所说运筹模型所用的语言主要是方程、函数等分析数学的语言,相应的运算是解方程等分析数学的运算。另一类运筹模型的主要语言是图、树、网络等,相应的运算也不同于方程求解,称为网络模型。

10.3.4 运筹数学

建立运筹模型后,求模型的解,找出最优解,研究解的特性,就成为解决运筹问题的关键所在。这就刺激和推动了运筹数学的产生和发展。作为一门学科,运筹学目前发展最快的是运筹数学,其主要内容就是各种运筹算法,如线性规划的单纯形算法,网络流的标号算法等。发展运筹算法的典范性工作之一是单纯形方法。

运筹数学的任务不仅在于提供好的算法,还在于利用数学手段论证事理规律,建立关于事理的深刻理论。运筹学奠基者之一的莫尔斯(P. M. Morse)就期望能发现与物理学基本定律(如热力学第二定律)一样的运筹学

定律。许国志则提出：“在物理学中能量是贯穿整个学科的主要概念。但目前于事理中还缺乏这种起着贯穿全局的概念。”⁵ 这些也就是钱学森等曾经提倡建立的理论事理学的目标，应是未来系统学的重要内容。运筹或事理研究几十年的发展史表明，目前尚无实现这个目标的可能。但是我们可以在较低的层次上进行工作，寻找一些更具体的活动的理性行为的规律。这类工作积累多了，就可能概括出更高层次的事理。

一个典范是对偶定理。我们以线性规划为例作简略的说明。在线性规划中，一个有限资源最优分配的实际问题用以下数学模型描述：

$$\text{目标函数 } \max \sum c_j x_j \quad (10.3.2)$$

$$\text{约束条件 } \sum a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10.3.3)$$

$$\text{非负条件 } x_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10.3.4)$$

这是原始规划。一个线性规划总伴随着下列规划，称为对偶规划：

$$\text{目标函数 } \min \sum b_i y_i \quad (10.3.5)$$

$$\text{约束条件 } \sum y_i a_{ij} \geq c_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10.3.6)$$

$$\text{非负条件 } y_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10.3.7)$$

其中， $y_1, y_2, \dots, y_m$ 称为对偶变量（对偶问题的决策变量）。

对偶定理断言：若 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ 和 $(y_1^0, y_2^0, \dots, y_m^0)$ 分别为上述问题的可行解，且 $\sum c_j x_j^0 = \sum b_i y_i^0$ ，则 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ 和 $(y_1^0, y_2^0, \dots, y_m^0)$ 分别为上述问题的最优解。任何优化问题都需有优化判据。对偶定理提供了最优解的一个判别准则。

在许多问题中，对偶定理还有实际意义。例如，从经济学看，对偶变量 y_j 可以解释为影子价格，对市场有调节作用。又如，在网络最大流问题中，原始规划的目标函数是由发点发往收点的最大流量，对偶规划的目标函数是最小截量，对偶定理保证达到最小截量的流量就是最大流量。

10.3.5 运筹学的软化

随着研究对象由简单的、“结构良好的”问题向复杂的、“结构不良的”问题推进，运筹学的局限性逐步暴露出来了。运筹学发展面临分岔点，“运筹学向何处去？”的问题尖锐地摆在运筹学家面前。面对越来越大的复杂性，一个重要的发展方向是“软化”。这里介绍以下三种思路。

(1) 西方的软运筹学 由切克兰德开始，系统方法论出现软化趋势，英国学者提出软运筹学概念。硬运筹学研究的是结构清楚、目的明确的问题，使用的理性工具是为定量描述而引入的数学模型，追求的是最优解。软运

筹学研究的是议题,即在社会过程中人们不断“构建的”、本身存在争议的问题,甚至是一团乱麻似的堆题(问题堆),使用的理性工具除了数学模型,还包括为理清思路而引入的概念模型,追求的是满意解或可行而满意的行动。软运筹学处于各种方法探索的起始阶段,观点纷纭。如一种称为“战略选择的发展和分析”的方法,通过认知图帮助人们整理和表述他们的观点,得出概念图,把概念图综合为战略图,作为获得共同决策目标的基础。

(2) 事理学 继钱学森、许国志提出事理概念后,钱学森、宋健又于80年代初提出事理学的概念。90年代中期,张锡纯专题研究了工程事理学⁶,钱学森进一步划分了运筹学与事理学的界限⁷。粗略地说,运筹学是关于“结构良好的”事理问题的数学理论,事理学是关于“结构不良的”事理问题的半定性半定量的科学理论;运筹学是最优化理论,事理学是寻求较优化或满意解的一般优化理论。所谓“结构不良的”事理问题,就是办事的目标、任务范围、计算允许的操作等都没有明确的定义,无法用数学形式表述。这些问题已超出运筹学范围,属于事理学的对象。看来,很可能不存在类似牛顿运动三定律那样普适的基本事理定律,不应当把物理学的规范简单移用于事理学。事理学尚未建立起来。即使将来建立起事理学,仍然要坚持使用科学与经验相结合的解决方法。当事理问题构成开放的复杂巨系统时,就得使用从定性到定量综合集成法来解决。

(3) 物理、事理、人理方法论 运筹问题的研究促使科学认识从物理进到事理,一般事理问题的研究又促使科学认识从事理进到入理。没有人的复杂结构总可以用“物理”最后说明,而有人的真正复杂系统要用“入理”去说明。基于这种情况,中国学者提出物理—事理—人理(WSR)系统方法论⁸,认为在处理复杂问题时,既要考虑对象的物的方面(物理),又要考虑如何更好使用这些物的事的方面(事理),还要考虑由于认识问题、处理问题、实施管理与决策都离不开人的方面(人理)。把这三方面结合起来,利用人的理性思维的定性、连续、多层次、阶序性以及形象思维的综合、灵活和创意性,去组织实践活动,以产生最大的效益和效率。

10.4 信息论

10.4.1 信息与系统

客观世界是由物质、能量、信息三大要素组成的。自贝塔朗菲以来的系统科学代表人物都承认,必须也能够撇开对象有关物质、能量的特殊规定性

仅仅把对象当作系统来研究,但不能撇开信息来研究系统。元素之间、子系统之间的相互联系和作用,系统与环境的相互联系和作用,都要通过交换、加工、利用信息来实现;系统的演化,整体涌现性的产生,高层次的出现,都需要从信息观点来理解。信息也是系统科学的基本概念。

人类的社会生活须臾离不开信息。生存发展的实际需要迫使人类从远古起就把与信息打交道作为必须的生活技能来对待,形成不同的信息作业,包括信息的获取(感测和采集)、信息的表示和固定、信息的发送、信息的传输、信息的接收、信息的加工处理、信息的存储、信息的检索和提取、信息的利用和控制等。最初的人类基本是靠自身的信息器官进行信息作业的,受到极大限制。随着生产力和认识能力的提高,逐步学会把人体自身的信息能力外化、物化,发明创造了一些初步的信息技术,如获取信息的磅秤和指南针,处理信息的算盘,传递信息的烽火台等。利用这些技术,进行一些初级的信息作业。

在漫长的历史时期中,信息作业仅仅被当作工程技术或技巧问题,完全靠经验来处理,无需理论的指导。自从19世纪发明人工电信道以来,以通信技术为核心的信息作业日益需要科学理论的指导,包括定量的分析计算。物理学家开尔文(W. T. Kelvin)对海底电线的分析(1856)是对信息进行理论研究的肇始。他把电线的电阻和静电电容看作分布参数,用微分方程描述,对信号波形的畸变作出定量分析。20世纪20年代,奈奎斯特(H. Nyquist)对信道频率特性的分析,哈特利(R. V. L. Hartley)关于信息概念和信息量的想法,为信息论(学)的诞生做了重要的理论准备。到40年代,经香农、维纳等人的系统阐述,作为一门技术科学的信息论终于诞生了。

信息概念对于系统研究具有更广泛的意义。系统作为诸多部分的统一整体要生存和发展,它的组分之间必须协调有序地相互作用,系统与环境之间也必须协调有序地相互作用。这种协调有序的相互作用,有赖于元素之间、子系统之间、层次之间、系统与环境之间合理有效的信息联系、信息交换、信息操作。信息论于40年代一诞生就显示出对系统研究可能具有广泛的应用。贝塔朗菲把信息论看作系统研究的一个分支,试图从信息角度阐述他的一般系统论。维纳把通信作为沟通动物、社会、机器系统的桥梁,发展了玻尔兹曼、齐拉(L. Szilard)、薛定谔关于负熵的思想,明确提出信息的负熵原理,把信息作为系统组织程度的度量,把信息同系统的开放性联系起来,对后来的系统研究产生了深刻影响。现代自组织理论的倡导者普利高

津、哈肯、艾根等人试图从信息概念解释系统自组织过程。钱学森把信息论作为建立系统学的依据之一。以建立复杂系统一元化理论为目标的圣菲学者同样重视研究信息问题。这表明,讲系统不能不讲信息,必须从信息角度研究系统,已成为系统科学界的共识。关于信息的科学理论是系统科学的有机组成部分。

10.4.2 什么是信息

现代科学广泛接受了维纳的论断:“信息就是信息,不是物质也不是能量。”⁹但现代科学又证明信息归根结底是物质的一种属性,信息不能离开物质而单独存在,客观世界和人的大脑中都不存在与物质相分离的信息。一切信息都是由特定的物质运动过程产生、发送、接受和利用的,信息的发送者和接受者只能是某种物质实体或其衍生物,不存在与物质无关的信息,不能没有能量消耗而获取、传送、处理、存取和利用信息。任何信息都要靠一定的物质形式来盛载、表示、固定,盛载信息的物质形式称为信息的载体。信息的传递、交换、加工处理、存储、提取等操作都是通过对所谓信息载体的物质形式的传递、交换、加工处理、存储、提取来实施的。所以,信息归根到底是一种物质的属性。

但信息是一种非常特殊的物质属性,一种迄今为止自然科学尚无法全面解释的物质属性。与物质的其他属性不同,信息的功能是表征物质客体的成分、结构、状态、特性、行为、功能、演化趋势等,信息是能够表征一切物质属性的特殊物质属性。一个系统的信息只能在与其它系统的相互作用、相互关系中表现出来。通过相互作用,一个系统的信息可以从该系统中分离出来,转录(表示、固定)于叫做载体的其他物体上,而不改变该系统,这是信息最奇异的属性。依靠这种特性,我们能够不同某物直接接触而获得它的信息,进行跨空间的信息传送和利用。依靠这种特性,我们可以用符号表示、载带信息。依靠这种性质,我们可以进行跨时间的信息传送和利用,把前一时刻的信息存储起来,甚至把一个系统的信息保留到该系统消亡之后。依靠这种特性,我们可以在一个系统尚未产生时,先用符号系统建构它的信息形态,再利用技术手段把它实地建构出来。事物的信息可以同该事物分离开来、转录于载体之上,特别是盛载于纯粹的人造符号中,这种特点决定了信息不同于物质和能量,具有不守恒性、共享性。

从科学技术与社会的发展现状看,信息概念主要用于讨论与人类活动有关的系统问题,目前还难以用它描述一般系统。就这个范围而言,信息是

人们在通信(包括人与人、人与自然的通信)中得到的数据、资料、消息、情报、知识等等。需要强调的是信息具有时效性,信息对于接受者应是新资料、新知识,已经得到的数据、资料等等再作传送并不能增加信息。所以,我国的《辞源》把信息定义为“是人们事先不知道的报道”。

电报、电话等通信技术的发展,经常遇到通信线路中传送了信号(消息)但有时并未传送信息的现象,要求给出理论解释。哈特利提出区分信息与消息的问题,认定消息是载荷信息的符号序列,是信息的载体,信息是包含在消息中的内容,信号(主要是声信号、光信号和电磁信号)是消息的物质体现。存在着没有信息的符号序列。因此,传送消息即符号序列不等于传送信息。

从通信角度看信息是什么的问题,要从人们为什么要求通信或通信系统中传送的究竟是什么谈起。把信息从空间的某一处传送到相异的另一处的操作,或者从前一时刻传送到后一时刻的操作,称为通信。凡通信至少涉及发送信息者和接收信息者两个事物,通信是两者之间的一种特定联系。接收信息的一方需要了解发送信息一方的状态或行为,但后者有多种可能状态或行为,实际发生的是哪种状态或行为,通信前是不知道(不确定)的。存在“先验的”不确定性产生通信的必要性,是通信的前提。收到信息就消除了这种不确定性,通信系统中传送的正是这种能够消除接收方不确定性的东西。所以,信息就是通信中消除了的不确定性,亦即增加了确定性。这是技术科学层次公认的信息定义。

实际的通信过程可能完全消除了不确定性,也可能只是部分地消除了不确定性,甚至完全没有消除不确定性。因此,香农把信息定义为两次不确定性之差,即

$$\text{信息} = \text{通信前的不确定性} - \text{通信后仍有的不确定性} \quad (10.4.1)$$

若通信后完全消除了不确定性,上式的第二项为零,收方得到发方传送的全部信息。若通信后完全没有消除不确定性,上式右边两项相等,没有传送任何信息。一般情况下,某次通信后总会消除部分不确定性,又没有完全消除不确定性。

10.4.3 信息的度量

要建立关于信息的理论,使信息作业获得理论依据,关键是找到度量信息的方法,给信息以定量刻划。既然把信息定义为通信中消除了的不确定性,信息的度量就是对这种不确定性的度量。但这样定义的信息不是一般

的物理量,不能像体积、重量、速度那样用精确定义的单位实际测量。信息是一种抽象量,需要以新的观点解决这个问题。

通信要消除的不确定性指消息发生的随机性,数学上用概率来度量。令 p 记可能消息 A 发生的概率, I 记该可能消息携带的信息量,称为自信息,它有两个基本特征:

(1) 一个可能消息携带的信息量由该消息发生的概率决定,概率大者信息量小,概率小者信息量大(信息是消息发生的意外程度的度量),即

p	小	大
I	大	小

这表明信息量 I 是概率 p 的某个函数

$$I = f(p) \quad (10.4.2)$$

(2) 信息量具有可加性,即设 A 、 B 为两个独立发生的可能消息,则联合消息 AB (A 与 B 同时发生)的自信息满足

$$I(AB) = I(A) + I(B) \quad (10.4.3)$$

满足这个条件的最简单的函数是对数。

综合这两个特点,单个可能消息的信息量(自信息)定义为

$$I = -\log_2 p \quad (10.4.4)$$

或等价地表示为

$$I = \log_2 1/p \quad (10.4.5)$$

可能消息包含的信息量是该消息发生概率的倒数的对数(以 2 为底),单位为比特。显然,二选一等可能消息携带的信息量为 1 比特。

人们在通信中面对的不是单个消息,而是可能消息集合(至少有两个可能消息),比较简单的情形是集合中包含有限个可能消息。定量地把握信息,重要的是了解可能消息集合的整体信息能力,需用整体平均信息量 H 来表示。整体平均信息量 H 又称为信息熵(见 7.2 节),其中 $I = \log_2 p_i$ 反映单个可能消息的意外程度, p_i 反映可能消息的发生频繁程度,两者对信息熵 H 的影响是矛盾的,信息熵概念把两者统一在同一公式中,可以全面反映可能消息发生的随机性对信息的影响,有效地刻划可能消息集合整体的信息能力,是系统科学和信息科学的重要概念之一。

10.4.4 通信理论

10.4.4.1 通信系统模型

信息的发送者,亦即通信过程中信息流通的起点,称为信源。信源可以是人、生物、机器、社会组织等。信息的接收者,亦即通信过程结束时信息的归宿,称为信宿。信宿也可以是人、生物、机器、社会组织等。原则上说,信源和信宿可以是自然界和人类社会存在的一切事物。信源与信宿的不同组合,构成不同的通信关系。但信息科学关心的主要是人—人通信、人—机通信、机—机通信以及不同社会组织之间的通信。从荷载信息的信号形式看有两类信源,发送离散信号的是离散信源(如用语言文字发送信息),发送连续信号的是连续信源(如电视图象)。

通信是由参与通信的诸事物或环节所构成的整体的一种运作过程,一种系统行为,包含一系列必要的操作步骤。离开一定系统的通信是不存在的。通信系统的具体结构和特性千差万别。撇开种种具体差别,一切通信系统具有如图 10.4.1 所示的共同结构。它是信息论主要创立者香农首先提出来的。

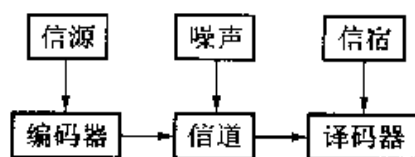


图 10.4.1 通信系统模型

10.4.4.2 信源与信宿

香农信息论实质是通信理论。从通信工程角度看,人们感兴趣的只是信源的统计特性。基于前面给出的统计信息定义,信息论关心的主要是信源的信息结构和数量特征。信息结构由信源的可能消息集合和概率分布决定。有了信源的信息结构,就可以计算信源的各种数量特性。我们仍然只讨论离散信源。

(1) 熵

熵是信源发送信息的能力的度量,即可能消息的整体平均信息量。由于 $p_i \geq 0$ 和 $I \geq 0$, 据(7.2.2)直接推知熵 H 具有非负性

$$H \geq 0 \quad (10.4.6)$$

等号只有当可能消息集合中有某个消息 x_k 为必然事件($p_k = 1$)、其余均为不可能事件($p_i = 0, i \neq k$)时才成立。

信源熵取决于可能消息个数 n 和概率分布。在 n 一定时,熵 H 取决于概率分布,即

$$H = H(p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (10.4.7)$$

改变概率分布可以改变信源发送信息的能力。概率分布不变,仅仅改变 p_i 的次序,熵 H 保持不变。这表示熵 H 具有对称性。

(2) 最大熵 $H_{\max}$

根据熵的性质,信源概率分布越均匀,熵 H 越大。在等概率分布 $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1/n$ 的条件下,熵达到最大值 $\log_2 n$,称为信源的最大熵,记作

$$\begin{aligned} H_{\max} &= H(1/n, 1/n, \dots, 1/n) \\ &= \log_2 n \end{aligned} \quad (10.4.8)$$

称为离散信源的最大熵定理。(10.4.8)表明,熵 H 具有极值性

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) \leq H_{\max} \quad (10.4.9)$$

(3) 相对熵

熵 H 与最大熵 $H_{\max}$ 的比值 $\frac{H}{H_{\max}}$,称为信源的相对熵。显然有以下关系成立

$$0 \leq \frac{H}{H_{\max}} \leq 1 \quad (10.4.10)$$

相对熵是信源的重要数量特征之一,可以看作消息集合概率分布均匀性的某种度量。概率分布愈均匀, H 愈接近 $H_{\max}$,相对熵愈大。完全均匀的等概率分布对应于最大的相对熵 1。概率分布愈不均匀,相对熵愈小。概率分布最不均匀的信源,相对熵为 0。

(4) 剩余度 γ

通信中除了在传送或恢复消息时所需要的最少的信息之外,其他出现在信源、信道以及信号和码符中或者系统其他部位的任何细节,都称为剩余,代表信源中不带信息的无益成分。剩余度是对这种无益成分的度量,记作 γ ,定义为相对熵和 1 的差值,即

$$\gamma = 1 - \frac{H}{H_{\max}} \quad (10.4.11)$$

显然有

$$0 \leq \gamma \leq 1 \quad (10.4.12)$$

剩余度大的信源发送的消息序列中的无益成分大,通信效率低。日常生活中人们主张说话或行文言简意赅,删除一切不必要的词句、符号等,就

是为了消除剩余度,提高通信效率。通信工程特别重视减少剩余度,提高通信的有效性。但通信中不可能完全消除剩余,系统有一定剩余也有好处,可以用它来提高通信的可靠性。

10.4.4.3 信道

广义地讲,两个物体直接碰撞而交换信息也算通信。但信息论不研究这种通信。在信息论考察的范围内,信息不能直接从信源传给信宿,必须通过一定的中介通道。把信息从信源传送给信宿的中介通道,称为信道。通信就是把信源发出的信息通过信道传送到信宿。有不同形式的信道。按照携带信息的信号的物理特性,人类借以通信的主要信道为声信道、光信道和电磁信道。按照是否存在噪声干扰,有无噪声(无错)信道和有噪声(有错)信道。按照信道的来源,有天然信道,如大气层是天然声信道,电磁场是天然电磁信道,太阳光场是天然光信道;也有人工信道,如根据蝙蝠探测目标的机理制造的声纳设备是一种人工声信道,电缆是人工电信道,光纤是人工光信道。

信道亦有性能高低优劣之别。当信源的输出信息量很大时,如果信道性能低劣,信息传送太慢,由于费时过多势必造成信息积压和损失。如果信源发送的信息量不大而信道性能很高,信道不能充分利用而造成经济损失。这就需要定量地描述和评价信道特性,为设计和使用信道提供根据。

衡量信道性能优劣的主要定量品质有两个。刻画信息传送快速性的是通信速度或信息传输率(传信率)。在无噪声情形下,信道传输信息的能力与所传输的信息量和传输时间有关。不同消息或信码携带的信息量不同,用信源的整体平均信息量即熵 H 来表示。不同信码在信道中传输的时间不同,用平均传输时间 τ (可以看作平均信码长度)表示。于是,可以定义信道的通信速度为单位时间传送的信息量:

$$R = \frac{(\text{每个消息的})\text{平均信息量}}{(\text{每个消息的})\text{平均传输时间}} \quad (10.4.13)$$

令 R 记通信速度,可以公式表示为

$$R = \frac{H}{\tau} \quad (10.4.14)$$

设信道输入信码为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 发生概率为 $p_1, p_2, \dots, p_n$, 满足归一性条件 $\sum p_i = 1$, 传送时间分别为 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ 。通信过程所传送的是在信码 x_i 中按其发生概率随机选择而形成的信码序列。设序列中共包含 N 个信码, N 相当大, 其中包含的各个信码数分别为 $p_1 N, p_2 N, \dots, p_n N$ 。

传送该序列的总时间为

$$T = \sum (p_i N) \tau_i \quad (10.4.15)$$

平均传送时间为

$$\tau = \frac{T}{N} = \sum p_i \tau_i \quad (10.4.16)$$

从通信速度看,传送时间 τ_i 长而发生概率 p_i 小的信码,由于在通信过程中很少出现,总的影响小。相反,传送时间 τ_i 短而发生概率 p_i 大的信码,由于频繁出现,对总的传送时间的影响要大得多。用统计平均方法计算平均传送时间,可以正确地反映这一点,与直观认识相符。于是有

$$\tau = \frac{-\sum p_i \log p_i}{\sum p_i \tau_i} \quad (10.4.17)$$

传送时间 τ_i 由信码特征和信道特性决定,信息量 H 由信源的特性决定。因此,通信速度是由信源和信道以及所采用的信码共同决定的系统特性。

由(10.4.17)可知,输入信号的发生概率通过影响待传送的信息量 H 和平均传送时间 τ 两个方面来影响通信速度。当信道特性给定时,通信速度 R 随信源信码的概率分布不同而变化。令 C 记其上限,即

$$C = \max_{p_i} R \quad (10.4.18)$$

C 称为信道容量,是衡量信道性能优劣的主要指标。通俗地讲,信道容量是信道最大可能的通信速度,表示信道传送信息能力的极限。

10.4.4.4 编码与译码

在人类涉足的通信活动中,信源与信道、信道与信宿都不能直接耦合,信源发出的信号不能直接在信道中传送,信道输出的信号不能为信宿直接接收,必须通过中介环节的变换。把信源与信道耦合起来的中介环节叫编码器,信源信号通过编码器获得可以在信道中传送的形式。把信道与信宿耦合起来的中介环节叫译码器,信道输出的信号通过译码器获得可以被信宿接收的形式。编码和译码都是变换信号形式的操作。

编码的主要功能不在于变换信源信号的形式。通信的基本要求是多快好省地传送信息。但多、快、好、省之间相互制约,要做到统筹兼顾,合理安排,需有科学理论指导和定量计算。信息学的编码理论是从提高通信的有效性、可靠性、经济性出发,从信源与信道在数量特性上如何最佳匹配着手来研究信号变换的。信源有信息率高低之分,信道有容量大小之别。信源

熵 H 越大, 传送信息所需信道容量 C 越大。 H 大而 C 小, 信息不能及时传出去, 通信效率不好。 H 小而 C 大, 信道能力不能充分发挥, 经济性不好。有效性与可靠性、可靠性与经济性之间也有矛盾。这就需要信源与信道在数量特性方面相互匹配。编码的主要功能即在于此。 H 与 C 都是统计量, 信源与信宿的匹配是统计特性的匹配。

根据编码的不同目的, 编码理论有 3 个分支。(1) 信源编码, 任务是对信源输出的信号进行变换, 主要是数据的压缩, 包括连续信号的离散化; 信源一般都有剩余, 通过信源编码减少这种剩余, 力求获得接近最大熵的信息含量, 以提高信号传送速度, 因而又称为有效编码。(2) 信道编码, 任务是对信源编码器输出的信号进行再变换, 包括区分通路、适应信道条件; 信道存在噪声, 噪声必然降低通信的可靠性, 需要通过信道编码而提高通信的可靠性, 因而又称为可靠性编码。(3) 保密编码, 任务是对信道编码器的输出进行加密性再编码, 以提高通信的保密性。

编码理论的核心是香农的 3 个编码定理, 回答通信系统在什么条件下可以编码, 在什么条件下不存在编码的可能性。最简单的是香农第一编码定理, 又称为无噪声离散信源编码定理, 揭示了信源符号(消息)经过编码后码符的平均长度与信源熵 H 之间的内在联系。定理表明, 要实现无失真的信源编码, 变换每个信源符号平均所需的最小码符数等于信源的熵。所以, 熵越大, 单位时间内传送的消息数越小, 定理在给出其界限的同时, 断言在界限的极限内消息总是可以传送的。信源编码的实质是通过变换信源可能消息的概率分布, 尽量与信道特性实现理想的匹配。上述定理表明这样做是有限度的, 指出在什么范围内存在编码方法。注意, 两者都是关于编码的存在定理, 没有给出具体的编码方法。

原则上讲, 译码是编码变换的逆变换。通信工程假定编码与译码是完全互逆的操作。以 P 记编码操作, P^{-1} 记译码操作, u 记待编码的消息, u' 记编码后的消息, 编码变换为

$$u' = Pu \quad (10.4.19)$$

译码变换为

$$u = P^{-1} u' \quad (10.4.20)$$

基于这个假定, 信息论不再专门研究译码过程。

10.4.4.5 噪声

通信过程中除了预定要传送的信号之外的一切其他信号, 统称为噪声。

噪声对通信带来诸多不利影响,或掩埋信息,或以假乱真,或使信息畸变,从而导致通信错误,损失信息量,严重时可能使通信完全失效。噪声是通信的大敌。物理学原理断定,真实的通信过程中必然存在噪声,人们无法完全避开它。糟糕的还在于,在同一系统中噪声信号与荷载信息的信号具有相同的物理形式,难以辨别。因此,人类只能在噪声中通信,在与噪声作斗争中通信。实际的噪声可能出现在通信系统的各个环节,但最集中的发生处是信道。通信理论讲的无噪声信道,只是噪声小到可以忽略时信道的理想化描述。

从通信理论看,同噪声作斗争有两个基本方面:(1) 提高通信可靠性,减少信道传送信号中的噪声。基本方法是利用剩余的有用性,在编码中加入适当形式的剩余,因而称为可靠性编码。令 P 记信号的平均功率, N 记噪声的平均功率,两者之比 P/N 称为信噪比。提高信噪比也是提高通信可靠性的手段。(2) 从混杂有噪声的信道输出信号中把噪声过滤掉,把掩埋在噪声中的有用信号检测出来。从通信角度看,一切噪声都是随机信号,具有统计特性,需用概率统计方法处理。信息论已建立了有关信号检测、滤波的理论和技術。

在信息论发展的早期,噪声被视为有百害而无一利的东西。但信息论后来的发展表明,噪声有时具有可以利用的积极意义。利用噪声能掩埋信息的特点,可以把它变为加密信号,提高通信的保密性。利用白噪声的特性,可以进行噪声通信。伪噪声编码信号的理论和技術已成为通信科学的重要研究领域。系统演化理论发现,噪声可以产生新信息,促使系统形成新的结构、特性和行为方式,具有极为重要的理论意义。

信息同噪声的区别是相对的。同一信号,对于这种通信过程携带的是信息,对于那种通信过程就可能是噪声。一切噪声信号都来自某个真实过程,携带着关于那个过程的状态、特性、规模、运行方式等信息。客观世界每时每刻都存在无穷多种信号传递过程,构成某个特定通信过程的噪声背景。基于这些考虑,信息论把噪声作为另一个重要的研究对象。

10.4.5 信息论的拓广

香农的通信系统模型是按照通信工程需要经过高度简化而建立的,特点之一是通信的单向性,信源与信宿界限分明。但实际的通信几乎都是双向的,通信双方既互为信源,又互为信宿,称为信息交流更为准确。如果从一般系统的生成、存续、演化角度看,双向通信的概念仍不满足要求,因为元

素之间不仅存在两两双向通信,还有多方通信,不同子系统之间、不同层次之间以及系统与环境之间也存在各种各样的双向或多向通信,构成复杂程度不同的各种通信网络。系统愈复杂,这种通信网络也愈复杂。人类社会生活中的信息网络建设、管理、使用,是技术科学层次的系统理论必须关注的重大问题。但系统科学的当前发展还很少涉及关于系统组分之间信息网络建立与优化的理论问题。钱学森认为:“信息学,那是专门研究系统成员之间的信息网络建立与优化”的学问。¹⁰这样来界定信息学(论)是科学的,它给学科发展指出一个十分重要的方向。

香农信息论只研究信源,不研究信宿,前提是通信工程中信源与信宿具有相同的信号信码库,只要把信号准确地传送到信宿,信宿便可以获得全部信息。实际系统的通信往往没有这么简单,信源与信宿的信号信码库并不完全一致,译码与编码并非完全互逆的变换,不同民族语言之间并非一一对应就是有力的佐证。而且,一个可能消息携带的信息量还取决于信宿的知识状况,信宿未曾得到过的新消息才能给他带来信息。通信过程的动态因素也需要考虑。因此,要建立一般系统的通信网络,建立系统与环境的通信网络,都需要独立于信源而研究信宿,独立于编码而研究译码。

人类通信主要是通过传递语言、文字符号进行的,包含语法信息、语义信息和语用信息 3 个层次。香农信息是语法信息,为了度量信息而采取了一个极为严格的假定:

通信的基本问题是在通信的…端精确地或近似地复现另一端所挑选的消息。通常,消息是有意义的;那就是说它按照某一种关系与某些物质或概念的实体联系起来。但通信的语义方面的问题与工程问题是没有关系的。¹¹

传递语言符号是为了传递其含义,在通信工程技术这个狭窄的范围之外,人类信息活动都不能不考虑消息的含义。信息还有效用和价值问题,即信宿收到信息后如何影响其行为的问题。信息的理论研究必须拓广到语义信息和语用信息。在这些方面,已经做过某些探索,提出语义信息和语用信息概念,以及把三者统一起来的全信息概念,但至今并无实质性进展。

社会越向前发展,人的生活越依赖于信息,发展到现在,社会开始从工业时代向信息时代转变,信息作业在内容、形式、种类、质量、数量、规模诸方面日趋多样复杂。在技术科学层次上谈信息,总是同人的活动联系在一起的。一切人工系统都需要从信息观点考虑它的设计、管理、利用、改进等问

题。信息网络的建立就涉及所有可能的信息作业。人类从事的各种信息作业中居核心地位的是信息处理。计算机科学和计算数学的发展使信息处理技术获得极大提高,但迄今尚未建立可以同信息传输理论相媲美的信息处理理论。香农给出的信息定义只是通信信息概念,只是对概率不确定性的度量。这是远远不够的。信息技术和技术科学层次系统理论的飞速发展,社会信息化的加速发展,要求拓展信息概念,给出更普遍的定义,即适用于一切信息作业的信息概念。

现代科学的各个方面也提出同样的要求。在无机界,从玻尔兹曼以来一直有人探索从信息观点研究物理现象。普利高津等人关于物理耗散结构的研究,特别是化学信息学的提出,表明这个领域需要并且能够引入信息概念。在生命现象领域,DNA的发现,基因学说的成就,信息生物学的兴起,表明解决生命起源问题、阐明生命的本质、建立关于人体这种复杂巨系统的科学理论必须拓展信息概念。在社会领域,既然社会生活须臾不能离开信息,社会科学的现代化必然越来越离不开科学的信息概念,信息传播学、信息经济学、信息法学等的兴起和发展,表明信息是描述社会这种特殊复杂巨系统的运行和演化的科学理论必须的基本概念。至于思维领域,由于意识、心理、思维现象本身就是信息活动,人的大脑是专门从事信息作业的复杂巨系统,描述这个系统运行机理的科学理论尤其离不开信息概念。既然一切现实系统、尤其各种复杂巨系统的描述都应建立在信息概念之上,关于复杂巨系统的一般理论必须把信息作为基本概念。因此,撇开具体学科的特殊性,建立关于信息的一般理论,应是未来科学发展的一项重大任务。这也是建立和发展系统学、使系统科学走向成熟的关键之一。^{12,13,14}

第 11 章 系统科学的工程技术

从前面的介绍中我们已经知道,系统科学是一门从总体上研究各类系统共性规律的科学。前几章主要讨论系统的概念、特征、分类及演化规律。而系统工程则是从总体上改造客观世界的工程技术实践,是组织管理系统的技术,是系统科学体系的工程应用层次。我们将在这样一个概念框架下,讨论系统工程研究与发展的一些基本问题。

11.1 系统工程的发展和应用

系统工程所研究的领域是自然科学、社会科学与工程技术相互交叉与综合的研究与应用领域,核心问题是组织管理与决策。从应用角度看,它涉及到国家各个方面、各个层次,从微观到宏观,从行业到部门,从中央到地方。从内涵上看,人类社会从农业经济到工业经济都已表明了组织管理也是生产力,正在兴起的以知识为基础的经济,组织管理就更重要了。所以,系统工程的产生归根到底来自社会实践的需要,它的发展也将随着科技进步、经济社会发展而发展。特别是当前以计算机、网络和通信为核心的这场信息革命,实际上是一次新的产业革命,必将对组织管理提出新的和更高的要求。世界上各发达国家都普遍重视这一领域的研究、应用和发展。对于我国来说,改革开放和社会主义现代化建设,是空前复杂的社会实践,迫切需要系统工程的理论方法与技术,同时也提出了许多新的问题需要研究与解决。

11.1.1 实践需要系统工程技术

我们知道,无论是改造和利用自然界用以发展社会生产力的工程,还是调整生产关系和上层建筑以适应生产力发展的社会工程,从根本上来说,都是社会实践,是工程实践。社会实践的特点是有明确目的性和组织性。要清楚干什么、为什么要干、能不能干以及怎样干才能干得好的问题。随着科学技术的发展,社会实践越来越丰富,也越来越复杂,突出表现在空间活动范围上越来越大,时间尺度变化上越来越快,层次结构上越来越复杂,效果和影响上越来越广泛和深远。在这种情况下,社会实践决不是想干什么就

干什么。社会实践不仅有自然属性,还有社会属性,甚至包括人的精神属性,这三个层次的特点,使社会实践具有高度的综合性、系统性、动态性和复杂性,它不容许我们孤立、片面、静止、简单地处理问题。

实践作为一个过程,包括实践前形成的思想、设想、规划、方案、计划以及可行性等应进行科学论证,以使实践的目的性建立在科学基础上,而不是仅仅在经验甚至感情和意志的基础上。研究、解决和回答这些问题,就涉及到决策科学化的问题,也包括实践过程中要有科学的组织管理与协调,保证实践的有效性。要讲究效率和效益,以取得最好的效果。还包括实践后的评估和总结,检验整个实践的科学性和合理性,以利于今后再实践,这也涉及到科学的组织管理问题。

对于一项具体实践工程,以上这些问题都关系到工程实践全局的整体问题。在实践比较简单的情況下,根据已有的经验和知识也许就能够解决这些问题。但复杂的社会实践重大工程,情况就大不一样了。如航天工程,火箭、导弹、航天器的研制是一项大规模的工程。这项工程的最终产品,本身就是个复杂的系统。它包括许多组成部分,每个组成部分又由许多部分组成,每个部分又由许多仪器、组件构成,每个仪器和组件又由许多单元、元件所组成,它们紧密联系在一起,构成一个能够完成给定任务的实际系统。从研制内容上看,包括了研究、设计、试制、试验和定型、生产以及交付使用;从科学技术角度看,涉及到多种学科、多种专业;从研制过程来看,包括预先研究、型号研制、正式生产三个阶段。对每类型号,都要同时有一个型号正在生产阶段,又有一个型号正在研制阶段,还有一个正在预先研究阶段,这就是“三步棋”的管理安排。从投入角度来看,这样大的工程需要投入大量人力、物力和财力。面对这样复杂的工程,如何进行组织管理,才能研制出技术上合理、经济上合算、研制周期短、质量可靠又能满足系统指标要求的实际产品。如果没有一套科学的组织管理方法与技术,这样复杂的大工程是难以取得成功的。

当今世界各国都高度重视可持续发展问题,我国已把它作为一项国家基本发展战略。可持续发展就其实质而言,是解决人与自然之间协同发展的問題。人类在大自然面前,既不能无所作为,但也不能为所欲为,任何违反客观规律的做法,到头来不仅不能发展,甚至连生存都将成为问题。这个问题对我国尤为紧迫和严峻,解决可持续发展的途径、战略、规划、政策措施和重大工程实施等决策问题,仅靠自然科学技术已经不够了,因为它还涉及

到社会,但仅靠社会科学也解决不了,需要的是把自然科学、社会科学和工程技术结合起来的综合优势和整体力量,才有可能解决这些问题。即使这样,还要处理有可能至今我们尚未遇到和认识的新问题。像我国改革开放和社会主义现代化建设这样极其复杂的社会实践,就有许多从未遇到过的新问题,这样的实践就更加复杂和困难,因而也就更需要研究和探索。

对任何一项具体实践工程,都是一个实际的具体系统,都是有人参与的物质系统。因此,有关系统工程的理论、方法和技术都可以应用到具体实践工程中去,这就是系统工程能在组织管理和决策中发挥作用的根本原因。当然,在应用到具体系统时,还应和这个系统的特点结合起来。具体来说,系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,对所有系统都具有普遍意义。它从系统整体出发,根据总体协调的需要,综合运用有关科学理论与方法,以计算机为工具,进行系统结构与功能分析,包括系统建模、仿真、分析、优化、评价和决策,以求得最好的或满意的系统方案并付诸实施。

系统论、系统学、运筹学、控制论、信息论等为系统工程提供了思想理论基础和方法,数学和计算机技术为系统工程提供了量化的技术和手段。由于实际系统不同,用到那类系统上,还得用到与那个系统有关的科学理论、方法与技术。从这些特点来看,系统工程不同于其他技术,它是一门综合性的整体技术,又是一门定性定量相结合的技术,是从整体上研究和解决问题的科学方法。

11.1.2 系统工程的发展和应用

系统工程是 20 世纪 40 年代,由美国贝尔电话公司在设计电话通信网络时提出来的。半个世纪以来,系统工程得到了迅速发展和广泛应用。

系统工程的发展包括两个方面,一方面是它的应用范围不断扩大,不仅用于工程系统,也可以用到其他系统中去;另一方面是系统工程方法的发展,可以用来处理更加复杂的系统,这两者也是相互促进的。

1978 年,钱学森、许国志、王寿云发表了“组织管理技术——系统工程”一文。¹ 这篇文章对我国系统工程发展和应用,起到了很大推动作用。近年来,国内外系统工程的应用领域日益广泛,从工程系统向社会经济系统扩展,几乎遍及工程技术和社会经济的各个方面。通过 20 多年的努力,系统工程与我国现代化建设的密切关系正在为更多的人所认识,逐步形成了一些专门系统工程分支,大体上有:

(1) 社会系统工程 它的研究对象是整个社会,是一个开放的复杂巨系统。它具有多层次、多区域、多阶段的特点,如社会经济系统的可持续发展总体战略研究。

(2) 经济系统工程 运用系统工程的方法研究宏观经济系统的问题,如国家的经济发展战略、综合发展计划、经济指标体系、投入产出分析、积累与消费分析、产业结构分析、消费结构分析、价格系统分析、投资决策分析、资源合理配置、经济政策分析、综合国力分析、世界经济模型等。

(3) 区域规划系统工程 运用系统工程的原理和方法研究区域发展战略、区域综合发展规划、区域投入产出分析、区域城镇布局、区域资源合理配置、城市水资源规划、城市公共交通运输规划与管理等。

(4) 环境生态系统工程 研究大气生态系统、大地生态系统、流域生态系统、森林与生物生态系统、城市生态系统等系统分析、规划、建设、防治等方面的问题,以及环境检测系统、环境计量预测模型等问题。

(5) 能源系统工程 研究能源合理结构、能源需求预测、能源开发规模预测、能源生产优化模型、能源合理利用模型、电力系统规划、节能规划、能源数据库等问题。

(6) 水资源系统工程 研究河流综合利用规划、流域发展战略规划、农田灌溉系统规划与设计、城市供水系统优化模型、水能利用规划、防汛指挥调度、水污染控制等问题。

(7) 交通运输系统工程 研究铁路、公路、航运、航空综合运输规划及其发展战略、铁路调度系统、公路运输调度系统、航运调度系统、空运调度系统、综合运输优化模型、综合运输效益分析等。

(8) 农业系统工程 研究农业发展战略、大农业及立体农业的战略规划、农业结构分析、农业综合规划、农业区域规划、农业政策分析、农业投资规划、农产品需求预测、农业产品发展速度预测、农业投入产出分析、农作物合理布局、农作物栽培技术规划化、农业系统多层次开发模型等。

(9) 企业系统工程 研究市场预测、新产品开发、CIMS及并行工程、计算机辅助设计、制造、生产管理系统、计划管理系统、库存、全面质量管理、成本核算系统、成本效益分析、财务分析、组织理论等。

(10) 工程项目管理 研究工程项目的总体设计、可行性、国民经济评价、工程进度管理、工程质量管理、风险投资分析、可靠性分析、工程成本效益分析等。

(11) 科技管理 研究科学技术发展战略、科学技术预测、优先发展领域分析、科学技术评价、科技人才规划、与科学管理系统等。

(12) 教育系统工程 研究人才需求预测、人才与教育规划、人才结构分析、教育政策分析等。

(13) 人口系统工程 研究人口总目标、人口参数、人口指标体系、人口系统数学模型、人口系统动态特性分析、人口政策分析、人口区域规划、人口系统稳定性等。

(14) 军事系统工程 研究国防战略、作战模拟、情报、通信与指挥自动化系统、系统武器装备发展规划、综合保障系统、国防经济学、军事运筹等。

需要特别说明的是,系统工程应用既强调系统分解,又强调在分解研究的基础上,再综合集成到系统整体,实现 $1+1>2$ 的飞跃,达到从整体上研究和解决问题的目的;系统工程强调人机结合,根据研究问题涉及到的学科和专业范围,组成一个知识结构合理的专家体系,通过机器体系、信息体系、模型体系、指标体系、评价体系、方法体系以及支持这些体系的软件工具的集成,实现系统的建模、仿真、分析与优化。机器体系的功能,随着信息技术的发展,具有很大的潜力。如美国普赖尔(Pryor)主持的“阿斯彭”系统的原型研究,建立了“虚拟现实(virtual reality)动态经济模型”。²

可以看出,系统工程已由工程系统工程发展到复杂系统工程,特别是复杂巨系统工程。社会系统工程就是典型的复杂巨系统工程。这就使系统工程进入到了一个新的阶段。系统工程经历了产生、发展和形成阶段。但是,系统工程作为一门新兴的综合性边缘科学,无论在理论上、方法上、体系上都处于发展之中,它必将随着生产技术、基础理论、计算工具的发展而不断发展。

11.2 系统工程方法论^{3,4,5}

系统工程研究的对象是复杂大系统。一般情况下,系统包含“硬件”单元,也包含“软件”要素,尤其是人的行为。因此,要有独特的思考问题和处理问题的方法,要用多种技术方案进行求解。这就是我们要讲的系统工程方法论。系统工程方法论除一般的数学描述方法和逻辑推理方法外,还有工程技术的规范和社会科学的艺术等。描述性、逻辑性、规范性、艺术性这些特点交织在一起,构成了系统工程独特的思想方法、理论基础、基本程序和方法步骤。系统工程方法论的基本特点是:研究方法强调整体性,技术应

用强调综合性,管理决策强调科学性。前面已经介绍钱学森等提出的从定性到定量的综合集成方法论,是研究开放的复杂巨系统的,本节不再赘述。本节只介绍霍尔和切克兰德的系统工程方法论、美国国防分析研究所提出的并行工程方法学。

11.2.1 霍尔和切克兰德的系统工程方法论

在系统工程的研究和应用中,人们逐渐地探索、积累和总结出多种科学的工作方法和程序。60~70年代具有一定代表性的主要有美国的霍尔的“三维结构”模式、英国的切克兰德的“调查学习”模式。

11.2.1.1 霍尔的三维结构⁶

1969年美国工程师霍尔(A. D. Hall)提出“三维结构”,对系统工程的一般过程作了比较清楚的说明,它将系统的整个管理过程分为前后紧密相联的6个阶段和7个步骤,并同时考虑到为完成这些阶段和步骤的工作所需的各种专业管理技术知识。三维结构由时间维、逻辑维和知识维组成,如图11.2.1所示。

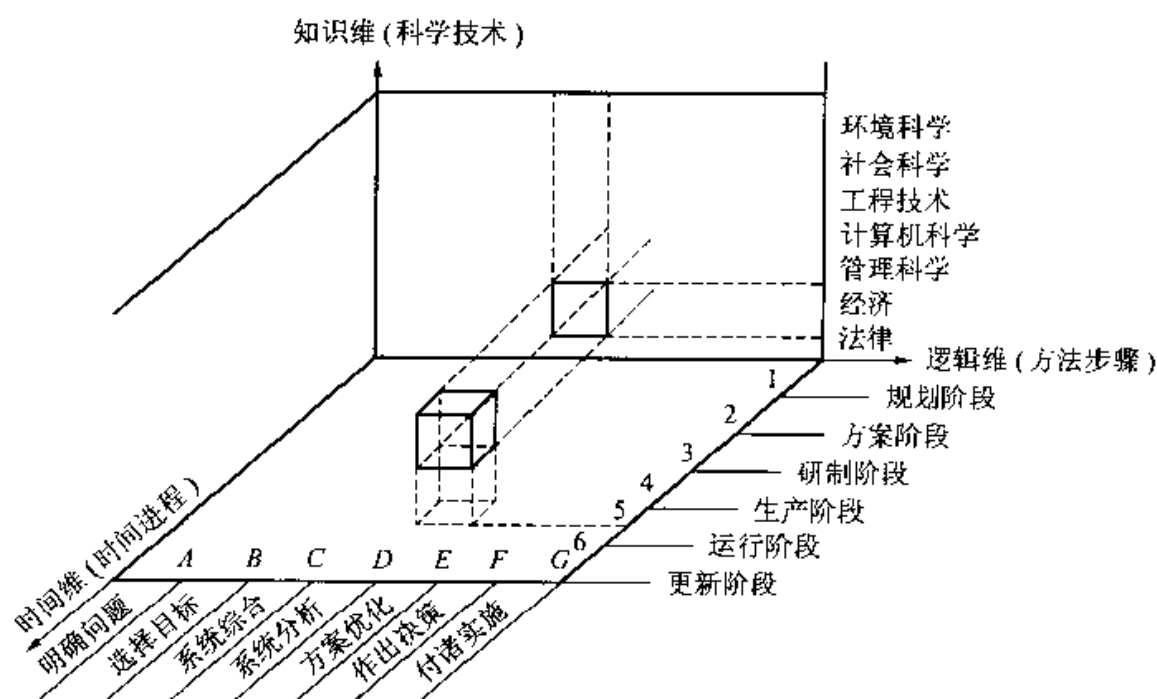


图 11.2.1 系统工程的霍尔三维结构

(一) 时间维

三维结构中,时间维表示从规划到更新,按时间顺序排列的系统工程全过程,分为6个阶段。

(1) 规划阶段:对将要开展研究的系统进行调查研究,明确研究目标,在此基础上,提出自己的设计思想和初步方案,制定出系统工程活动的方针、政策和规划。

(2) 方案阶段:根据规划阶段所提出的若干设计思想和初步方案,从社会、经济、技术可行性等方面进行综合分析,提出具体计划方案并选择一个最优方案。

(3) 研制阶段:以计划为行动指南,把人、财、物组成一个有机的整体,使各个环节、各个部门围绕总目标,实现系统的研制方案,并做出生产计划。

(4) 生产阶段:生产或研制开发出系统的零部件(硬软件)及整个系统。

(5) 运行阶段:把系统安装好,完成系统的运行计划,使系统按预定目标运行服务。

(6) 更新阶段:完成系统的评价,在现系统运行的基础上,改进和更新系统,使系统更有效地工作,同时为系统进入下一个研制周期准备条件。

(二) 逻辑维

三维结构中,逻辑维是指每个阶段所要进行的工作步骤,这是运用系统工程方法进行思考、分析和解决问题时应遵循的一般程序。

(1) 明确问题:尽可能全面地收集资料、了解问题,包括实地考察和测量、调研、需求分析和市场预测等。

(2) 选择目标:对所解决的问题,提出应达到的目标,并制定出衡量是否达标的准则。

(3) 系统综合:搜集并综合达到预期目标的方案,对每一种方案进行必要的说明。

(4) 系统分析:应用系统工程方法技术,将综合得到的各种方案,系统地进行比较、分析,必要时,建立数学模型进行仿真实验或理论计算。

(5) 方案优化:对数学模型给出的结果加以评价,筛选出满足目标要求的最佳方案。

(6) 作出决策:确定最佳方案。

(7) 付诸实施:方案的执行,完成各个阶段的管理工作。

(三) 知识维

三维结构中的知识维是指在完成上述各种步骤所需要的各种专业知识和管理知识,包括科学学、工程技术、经济学、法律、数学、管理科学、环境科学、计算机技术等方面的知识。运用系统工程知识,把6个时间阶段和7个

逻辑步骤结合起来,便形成所谓霍尔管理矩阵(见表 11.2.1)。矩阵中时间维的每一阶段与逻辑维的每一步骤所对应的点 a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, 7$),代表着一项具体的管理活动。矩阵中各项活动相互影响,紧密相关,要从整体上达到最优效果,必须使各阶段步骤的活动反复进行。反复性是霍尔管理矩阵的一个重要特点,它反映了从规划到更新的过程需要控制、调节和决策。因此,系统工程过程系统充分体现了计划、组织和控制的职能。管理矩阵中不同的管理活动对知识的需求和侧重也不同。在逻辑维的 7 个步骤中,体现了系统工程解决问题的研究方法,定性与定量相结合,理论与实践相结合,具体问题具体分析。

表 11.2.1 霍尔管理矩阵

逻辑维(步骤) 时间维(阶段)	1 明确问题	2 选择目标	3 系统综合	4 系统分析	5 方案优化	6 作出决策	7 付诸实施
1. 规划阶段	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}
2. 方案阶段	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}
3. 研制阶段	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}	a_{37}
4. 生产阶段	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}	a_{45}	a_{46}	a_{47}
5. 运行阶段	a_{51}	a_{52}	a_{53}	a_{54}	a_{55}	a_{56}	a_{57}
6. 更新阶段	a_{61}	a_{62}	a_{63}	a_{64}	a_{65}	a_{66}	a_{67}

总之,系统工程过程系统的每一阶段都有自己的管理内容和管理目标,每一步骤都有自己的管理手段和管理方法,彼此相互联系,再加上具体的管理对象,组成了一个有机整体。把系统工程过程系统运用于大型工程项目,尤其是探索性强、技术复杂、投资大、周期长的“大科学”研究项目,可以减少决策上的失误和计划实施过程中的困难。霍尔三维结构方法论不仅适用于工程系统,也同样适用于社会系统。

11.2.1.2 切克兰德的“调查学习”模式⁷

系统工程常常把所研究的系统分为良结构系统与不良结构系统两类。所谓良结构系统是指偏重工程、机理明显的物理型的硬系统,它可以用较明显的数学模型描述,有较现成的定量方法可以计算出系统的行为和最佳结果。解决这类工程系统工程问题所用的方法通常称“硬方法”,霍尔三维结构主要适用于解决良结构的硬系统。所谓不良结构系统是指偏重社会、机

理尚不清楚的生物型的软系统,它较难用数学模型描述,往往只能用半定量、半定性或者只能用定性的方法来处理问题。解决这类社会系统工程问题所用的方法,通常称为“软方法”。“软”的主要原因是它加入了人的判断和直觉,因此,解决问题时不像硬方法可以求出最佳的定量结果,而是所求出的结果一般是可行的满意解。切克兰德的“调查学习”模式属于这类“软方法”。到目前为止,解决不良结构的软系统方法已提出一些,如专家调查法(德尔菲法,Delphi)、情景分析法(scenario)、冲突分析法(conflict analysis)等等,但从系统工程方法论角度看,切克兰德的“调查学习”方法具有更高的概括性。

切克兰德的“调查学习”软方法的核心不是寻求“最优化”,而是“调查、比较”或者说是“学习”,从模型和现状比较中,学习改善现存系统的途径。它的方法步骤如下,流程图可用图 11.2.2 表示。

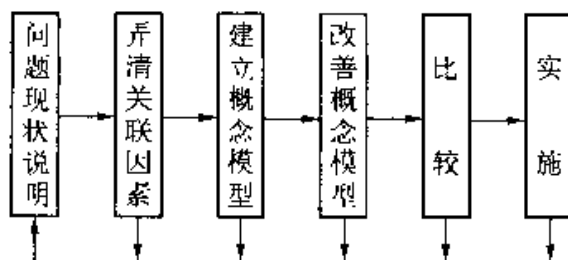


图 11.2.2 切克兰德“调查学习”方法流程图

(1) 不良结构系统现状说明。通过调查分析,对现存的不良结构系统的现状进行说明。

(2) 弄清关联因素。初步弄清、改善与现状有关的各种因素及其相互关系。

(3) 建立概念模型。在不能建立数学模型的情况下,用结构模型或语言模型来描述系统的现状。

(4) 改善概念模型。随着分析的不断深入和“学习”的加深,进一步用更合适的模型或方法改进上述概念模型。

(5) 比较。将概念模型与现状进行比较,找出符合决策者意图而且可行的改革途径或方案。

(6) 实施。实施提出的改革方案。

11.2.2 并行工程方法学

并行工程(concurrent engineering,简称 CE)是美国在 80 年代末提出的,

在计算机集成制造系统 CIMS 和系统工程中发展起来的工程技术,也是美国国防部在 90 年代乃至 21 世纪发展武器装备系统的基本管理模式。其核心内容是:强调用户需求,并把用户需求转化为完整的产品要求;交互作用、互相协调的并行研制过程,以便将产品的设计与产品的制造过程和保障过程用系统工程方法综合在一起,从而在产品的整个研制过程中综合考虑其性能、可靠性、维修性、保障性和生产性;建立多学科(多专业)的综合产品研制机制及计算和辅助工程环境。并行工程作为系统工程在制造领域的应用,主要是用于工程系统问题,但并行工程的思想哲理在以计算机和网络系统为支持环境的组织管理乃至整个社会系统中仍有很大的应用前景。

11.2.2.1 并行工程哲理

IDA 的温纳(R. Winner)等人对并行工程的定义⁸是:并行工程是对产品及相关过程,包括制造过程和支持过程,进行并行、一体化设计的一种系统化方法,这种方法力图使产品开发者从一开始就考虑到产品全生命周期从概念形成到产品报废的所有因素,包括质量、成本、进度和用户需求。

因此,并行工程所体现的主要思想有:

(1) 约束信息的并行性 设计时同时考虑产品生命周期的所有因素,作为设计结果,同时产生产品设计规格(或 CAD 文件)和相应的制造和支持过程计划。

(2) 功能的并行性 产品生命周期所涉及的各功能领域工程活动并行交叉进行。

(3) 集成性 要求实现产品及其过程的一体化并行设计,根本在于研究开发、产品设计、过程设计、制造装配和市场的全面集成。

(4) 协同性 多学科并行工程小组协同工作,即产品全生命周期中各阶段不同领域技术人员(包括顾客和供应商)的全面参与和协同工作。

(5) 科学性 并行工程采用了迄今最为先进的开发工具、方法和技术,如全面质量管理、系统工程方法、质量工程方法、计算机辅助系统等。

T、Q、C、S 是并行工程强调的四大要素:分别指加速产品开发周期、提高产品质量、降低成本、提供优质服务。并行工程实际上是系统工程原理的深入和应用,也可以说是一种更为广义的优化设计,更加着重于集成性、协同性、并行性。因此,并行工程是系统工程在 90 年代的新挑战。

11.2.2.2 并行组织管理模式

传统组织管理理论中的一个基本概念是将工作划分成各种专业化的任

务,然后根据这些专业化的任务组成不同的部门。一般地,在组织中存在两种类型的专业分工:(1)以组织的等级结构为代表的垂直方向的专业化分工;(2)以部门为代表的水平方向的专业化分工。而并行工程过程要求的信息集成化,将使企业内各组织单位之间的相互关系更加紧密,以致会打乱和冲破传统部门之间的界限划分。因此,信息集成化往往会引起企业内部信息交流渠道的再构造。一方面可以通过企业组织结构的重组来实现,另一方面还可以通过利用先进的计算机和通信技术来加强。这样与并行工程过程相应的组织结构应该是一种协作组织结构,有利于促进组织间包括垂直和水平两个方向的通信。垂直方向的集成缩短了信息传递途径,而水平方向的集成则能加强不同领域间的融合与协作。因此,并行工程对组织结构的影响表现为向扁平型组织结构演化的趋势。

多功能小组是并行工程实施过程中普遍采用的组织结构形式。小组成员来自产品生命周期相关的主要技术领域,他们共同负责产品从需求分析直到交付使用过程中的所有工作,是一种群体工作模式。这种组织结构形式已经得到普遍的认可,并已在实践中得到成功的应用。

11.2.2.3 并行工程的实施步骤

并行工程的实施可根据自动化程度分为三类,即小组化方法、计算机辅助方法和计算机支持的协同工作方法。小组化方法是以人为中心的方法,他们根据工作过程决定什么时候使用什么工具,通过人的交互工作实现功能和信息的集成。计算机支持的协同工作方法提供了一个全面集成的企业环境,既强调人的作用,又强调技术的支持,是小组化方法和计算机集成支持环境相结合的方法。

企业实施并行工程牵涉到企业组织结构及经营的各个方面,必须按照并行工程管理技术和方法组织实施,实施步骤如下:

- (1) 制定并行工程实施计划:顶层管理人员了解并行工程和过程管理的有关概念,分析企业现有业务流程、组织结构和管理模式,考察并行工程将要影响的所有方面,制定实施纲要。初步确定导入 CE 的实验项目,根据项目涉及的功能领域,组织 CE 小组;
- (2) 确定明确的开发目标;
- (3) 并行工程培训和基础设施准备;
- (4) 分析现有过程;
- (5) 按照重组原则改进现有的过程模型;

(6) 实施新过程;

(7) 评价结果并改进。

大量实践表明,实践并行工程能使应用项目取得明显的效益,提高企业竞争能力。例如,美国《BYTE》杂志1994年第7期报道了洛克希德导弹与空间企业(LMSC)采用并行工程的方法缩短新型号导弹开发周期的消息,题为“加速工程设计”,LMSC采用并行工程的方法,最终使产品开发周期缩短了60%,完成了预定的目标,在计划的24个月内完成任务,而过去一般需要5年。

11.3 系统建模、仿真与分析

要对复杂系统进行有效的分析研究并得到有说服力的结果,就必须首先建立系统模型,然后借助模型对系统进行定性与定量相结合的分析。因此,系统建模是系统工程解决问题的必要工具。系统仿真是近30年来发展起来的一门新兴技术学科。所谓仿真就是利用模型对实际系统进行实验研究。由于安全上、经济上、技术上或者是时间上的原因,对实际系统进行真实的物理实验很困难,有时甚至不可能。因此,系统仿真技术是十分重要甚至必不可少的工具。特别是随着计算机技术的发展,系统建模仿真技术日益受到人们的重视,其应用领域也愈来愈广泛。从最初应用于航空、航天、核反应堆等少数领域,逐步发展到电力、冶金、机械、电子、网络通信、社会经济、军事、交通运输、生态环境、企业管理等众多领域,成为分析、设计和研究各种系统的重要手段和辅助决策工具。本节将从系统科学的工程技术层次上,对系统建模、仿真和分析的基本思想、方法进行讨论。

11.3.1 系统建模方法

系统模型是一个系统某一方面本质属性的描述,它以某种确定的形式(例如文字、符号、图表、实物、数学公式等)提供关于该系统的知识。系统模型一般不是系统对象本身,而是现实系统的描述、模仿或抽象。系统是复杂的,系统的属性也是多方面的。对于大多数研究目的而言,没有必要考虑系统的全部属性。因此,系统模型只是系统某一方面本质属性的描述,本质属性的选取完全取决系统工程研究的目的。所以,对于同一个系统来说,由于不同的研究目的,可以建立不同的系统模型。因此,系统模型的建立既是一种技术,又是一种“艺术”。

系统模型反映着实际系统的主要特征,但它又高于实际系统而具有同

类问题的共性。因此,一个适用的系统模型应该具有如下 3 个特征:

- (1) 它是现实系统的抽象或模仿;
- (2) 它是由反映系统本质或特征的主要因素构成的;
- (3) 它集中体现了这些主要因素之间的关系。

系统模型按与时间的依赖关系有静态和动态模型之分,按是否描述系统内部特性有“黑箱”和“白箱”模型之分,按变量形式有确定性、随机性、连续型、离散型之分,按变量之间的关系有代数方程、微分(差分、迭代)方程、统计型、逻辑型之分。针对不同的对象系统,可以采取不同的方法建造系统模型。常用的系统建模方法有以下 5 种:

(1) 推理法:对于内部结构和特性已经清楚的系统,即所谓的“白箱”系统,可以利用已知的定律和定理,经过一定的分析和推理,得到系统模型。

(2) 模拟法:对于那些内部结构和特性不很清楚的系统,即所谓的“灰箱”系统,则可以通过建立计算机仿真模型,来模拟实际系统的行为,通过模拟的输入和输出结果,评价和确认系统模型。

(3) 辨识法:对于那些内部结构和特性不清楚的系统,即所谓的“黑箱”系统,若允许进行实验性观察,则可以通过实验方法测量其输入和输出,然后按照一定的辨识方法,建立系统模型。

(4) 统计分析法:对于那些内部结构和特性不清楚,又不允许直接进行实验观察的系统,可以采用数据收集和统计分析的方法来建造系统模型。

(5) 混合法:大部分系统模型的建造往往是上述几种方法综合运用结果。

系统科学强调系统的演化过程,因此,系统模型应是动态的,建模方法应以模拟法和混合法为主。因此,我们不去具体讨论系统工程的建模方法以及解析结构模型、层次分析法、投入产出模型、预测模型、评价模型、多目标决策网络模型、PERT 网络技术等,而是从整体与局部的结构演化关系上,探讨系统科学的建模方法基本思路。

这里所涉及的系统模型主要采用一种形式化的动力学描述方法,利用物理学的术语,考虑一个广义的流场。在一定的观测层次上,一切宏观变化都可以看成是流场中的物质/能量/信息流,它受到位于广义的源(source)和汇(sink)之间“热力学熵产生” $P = dS/dt$ (其中 S 为熵)的驱动。在流场中,因为非平衡而存在一种广义的力 X ,力 X 的大小取决于源和汇的“距离”,即 $X = d(\text{source}, \text{sink})$ 。它可以是温度梯度、浓度梯度、化学亲和势等,这种

力驱动着流场中的不可逆过程。在某一临界点 $X_{\text{临界}}$ 处,由于非线性作用,流场中某一部分的微涨落被放大,从而产生一种新的汇,它吸引流场中的流而自然产生出有一定序的整体,这种涌现的整体便是我们要描述的、能观测到的系统结构的演化。

采用这种动力学系统建模方法,是因为动力学系统理论给我们提供了描述系统动态行为和演化规律的模型,提供了系统分析的语言,它不但可以用于连续系统,如耗散结构理论、协同学中对自组织和系统演化的描述,而且可以用于离散系统,如元胞自动机、随机布尔网络、神经元网络和 L-系统 中对自组织和系统演化的描述。因此,特别适用于描述复杂系统的整体性、稳定性、适应性和演化。这一研究复杂系统建模方法的特点是:

- (1) 从所论系统的低一层次进行研究,涉及的单元(元素)数量较大;
- (2) 单元(元素)间局部连接,寻找局部连接规则;
- (3) 用吸引子来定性描述系统整体与局部的关系;
- (4) 从单元(元素)之间的相互作用体现系统整体的涌现性。

这是一种数学理性化的范式和方法,是一种从小规模性质到大规模系统的整体建模方法,在第4、第5章中已经介绍了这种方法。

11.3.2 系统仿真方法

系统仿真是对实际系统的一种模仿活动,是对实际系统的一种抽象的、本质的描述。这种描述是与系统建模紧密联系在一起的,包含系统对象、系统模型以及计算机工具等3个基本要素。系统仿真的确切概念是指通过建立和运行计算机仿真模型,来模仿实际系统的运行状态及其随时间变化的规律,以实现在计算机上进行实验的全过程。通过对仿真运行过程的观察和统计,得到被仿真系统的仿真输出参数和基本特性,以此来估计和推断实际系统的真实参数和性能。

11.3.2.1 系统仿真的特点

从以上的概念和实际问题可以看到,首先,系统仿真是一种有效的“实验”手段,它为一些复杂系统创造了一种“柔性”计算机实验环境,使人们有可能在短时间内获得对系统运动规律以及未来特性的认识。第二,系统仿真实验是一种计算机上的软件实验,因此它需要较好的仿真软件(包括仿真语言)来支持系统的建模仿真过程。第三,系统仿真的输出结果是在仿真过程中,由仿真软件自动给出的。第四,一次仿真结果,只是对系统行为的一次抽样,因此一项仿真研究往往是由多次独立的重复仿真组成的,所得到的

仿真结果也只是对真实系统进行具有一定样本量的仿真实验的随机样本。因此,系统仿真往往要进行多次实验的统计推断,以及对系统的性能和变化规律作多因素的综合评估。

目前,系统仿真作为系统研究和系统工程实践中的一个重要技术手段,在各种具体的应用领域中表现出越来越强的生命力。特别在求解一些复杂系统问题中,系统仿真具有下列优点:

(1) 系统仿真面向实际过程和系统问题,将不确定性作为系统的随机变量来处理,建立系统的内部结构关系模型,从而使我们对复杂的、带有多种随机因素的系统,可以方便地通过计算机仿真实验求解,避免了求解复杂的数学模型的困难。

(2) 系统仿真采用面向对象的建模分析方法,使用人机友好的计算机软件,使建模仿真直接面向分析人员,他们可以集中精力研究问题的内部因素及其相互关系,而不是计算机编程、调试及实现。

(3) 系统仿真为分析和决策人员提供了一种有效的实验环境,他们的设想和方案可以通过直接调整模型的参数或结构来实现,并通过模型的仿真运行得到其“实施”结果,从而可以从中选择满意的方案。

随着计算机软硬件性能的提高,出现了所谓的图形建模、可视建模方法和工具,从而使仿真建模工作变得轻松、方便。智能化技术的引入,产生了各种自动建模环境。仿真理论的发展,也使模型的验证、确认、优化进一步自动化,仿真的精确性得以提高。计算机技术中的大规模并行处理技术、多媒体技术、虚拟现实技术、分布式网络技术、面向对象技术与仿真技术相结合,成为多媒体仿真、分布式仿真等许多新的研究方向。

11.3.2.2 系统仿真的基本步骤

根据研究的系统对象的性质,系统仿真可分为连续系统仿真和离散事件系统仿真。连续系统是指系统状态随时间连续变化的系统,系统行为通常是一些连续变化的过程。连续系统模型通常是用一组方程式描述,如微分方程、差分方程等(注意:差分方程形式上是时间离散的,但状态变量的变化过程本质上是时间连续的,如人口的变化过程、导弹运动、化工过程等)。因此,连续系统仿真的主要任务就是如何求解系统运动方程组模型。在离散事件系统中,表征系统性能的状态只在随机的时间点上发生变化,且这种变化是由随机事件驱动的,在两个时间点之间,系统状态不发生任何变化。系统仿真作为一项应用技术,在实施系统仿真时,一般遵循以下基本步骤。

(1) 问题描述与定义:系统仿真是面向问题而不是面向整个实际系统,因此,首先要在分析、调查的基础上,明确要解决的问题,以及实现目标。确定描述这些目标的主要参数(变量)以及评价准则。根据以上目标,要清晰地定义系统边界,辨识主要状态变量和主要影响因素,定义环境及控制变量(决策变量)。同时,给定仿真的初始条件,并充分估计初始条件对系统主要参数的影响。

(2) 建立仿真模型:首先它是面向问题和过程的。在离散系统仿真建模中,主要应根据随机发生的离散事件、系统中的实体流以及时间推进机制,按系统的运行进程来建立模型;而在连续系统仿真建模中,则主要根据系统内部各个环节之间的因果关系、系统运行的流程,按一定方式建立相应的状态方程或微分方程来实现仿真建模。其次,建立仿真模型与所选用的仿真语言相关。例如,选用通用仿真系统 GPSS 语言时,仿真模型将采取实体流和模块图的形式;当选用带排队功能的图形评审技术 Q - GERT 或风险评审技术 VERT 仿真语言时,仿真模型将为随机网络的形式;如果采用多功能仿真语言 SLAM 时,则既可构造随机网络和离散事件的仿真模型,也可构造微分方程或差分方程的仿真模型。当实际系统可以用因果关系和流程图来建立模型时,可采用系统动力学 DYNAMO 仿真语言来实现仿真。这些常用的仿真语言和方法不再赘述。

(3) 数据采集:为了进行系统仿真,除了要有必要的仿真输入数据以外,还必须收集与仿真初始条件及系统内部变量有关的数据。这些数据往往是某种概率分布的随机变量的抽样结果,因此需要对真实系统的这些数据作必要的统计调查,通过分布拟合、参数估计以及假设检验等步骤,确定这些随机变量的概率密度函数,以便输入仿真模型实施仿真运行。

(4) 仿真模型的确认:在仿真建模中,所建立的仿真模型能否代表真实系统,要按照统一的标准对仿真模型的代表性进行确认。目前,常用的是三步法确认,第一步由熟知该系统的专家对模型作直观和内涵的分析评价;第二步是对模型的假设、输入数据的分布进行必要的统计检验;第三步是对模型作试运行,观察初步仿真结果与估计的结果是否相近,以及改变主要输入变量的数值时仿真输出的变化趋势是否合理。然而,由于仿真模型确认的理论和方法目前尚未达到完善的程度,改进仿真模型的确认方法使之更趋定量化,仍然是系统仿真的一项研究课题。

(5) 仿真模型的编程实现与验证:在建立仿真模型之后,就需要按照所

选用的仿真语言编制相应的仿真程序,在计算机上作仿真运行实验。为了使仿真运行能够反映仿真模型的运行特征,必须使仿真程序与仿真模型在内部逻辑关系和数学关系方面具有高度的一致性,使仿真程序的运行结果能精确地代表仿真模型应当具有的性能。通常这种一致性由仿真语言在编程中得到保证。但是,在模型规模较大或内部关系比较复杂时,仍需对模型与程序之间的一致性进行验证。通常采用程序分块调试和整体程序运行的方法来验证仿真程序的合理性和正确性。

(6) 仿真实验设计:在进行正式仿真运行之前,一般均应进行仿真实验框架设计,也就是确定仿真实验的方案。这个实验框架与多种因素有关,如建模仿真目的、计算机性能以及用户需求等。通常,仿真实验设计包括仿真时间区间、精度要求、输入输出方式、控制参数的方案及变化范围等。

(7) 仿真模型的运行:经过确认和验证模型,就可以在实验框架指导下在计算机上进行运行,了解模型对各种不同输入及各种不同仿真方案的输出响应,通过获得的所需实验结果和数据,掌握系统的变化规律。

(8) 仿真结果的输出与分析:对仿真模型进行多次独立重复运行可以得到一系列的输出响应和系统性能参数的均值、标准差、最大和最小数值及其他分布参数等。但是,这些参数仅是对所研究系统作仿真实验的一个样本,要估计系统的总体分布参数及其特征,还需要在仿真输出样本的基础上,进行必要的统计推断。通常,对仿真输出进行统计推断的方法有:均值和方差的点估计,满足一定置信水平的置信区间估计,仿真输出的相关分析,仿真精度与重复仿真运行次数的关系以及仿真输出响应的方差衰减技术等。

以上所述是系统仿真的一般步骤,从问题定义开始,通过建立仿真模型、收集数据、完成模型确认、仿真编程实验和验证,在仿真实验设计的基础上,重复仿真模型运行,并对仿真结果进行统计分析和统计推断,直到为决策者提供满意的方案为止的全过程,是一个迭代过程。这一过程的逻辑顺序关系如图 11.3.1 所示。

11.3.3 系统分析方法

目前,对于系统分析的解释有广义与狭义之分。广义的解释是把系统分析作为系统工程的同义语,狭义的解释是把系统分析作为系统工程的一个逻辑步骤,系统工程在处理大型复杂系统的规划、研制和运用问题时,必须经过系统分析这个逻辑步骤。由此可以看出,不论作何种解释,系统分析

都是相当重要的。

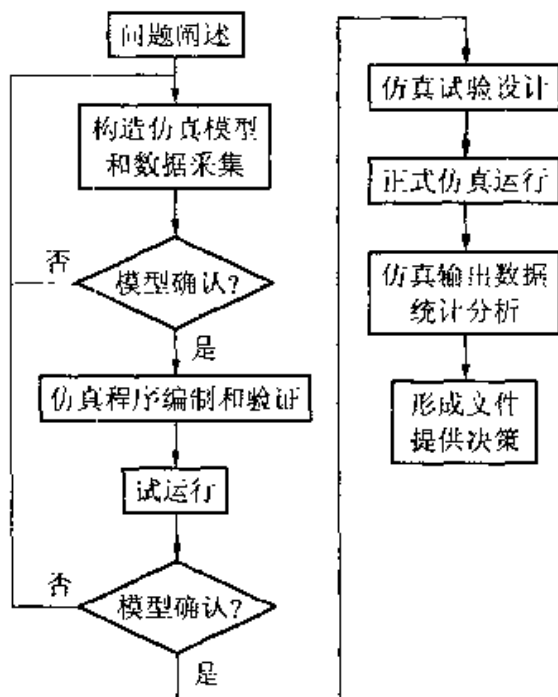


图 11.3.1 系统仿真的内容和步骤

系统分析是运用逻辑思维推理的方法对问题进行分析,在 11.2 节中,我们已对霍尔三维结构中的逻辑维进行了比较详细的剖析,这里所讲的系统分析步骤与霍尔三维结构中的逻辑维没有本质的区别。在分析时往往要通过一系列的“为什么?”而使问题得到圆满的解答。系统分析的基本要素有:目标、可行方案、费用、模型、效果、准则和结论,下面对它们分别加以说明。

(1) 目标:系统的目标就是对系统的要求,它是系统分析的基础。系统分析人员最初的也是最重要的任务就是要了解领导者意图,明确存在的问题,确定系统的目标。

(2) 可行方案:可行方案是指能够实现系统目标的各种可能的途径、措施和办法,到底其中哪一种最合适,这正是系统分析所要解决的问题。

(3) 费用:费用是每一方案用于实现系统目标所需消耗的全部资源(用货币表示)。系统分析要研究费用的构成,计算系统的“寿命周期总费用”。由于各种方案的费用构成可能很不一样,所以必须用同一种方法去估算它们,这样才能进行有实际意义的比较。

(4) 模型:是对系统本质的描述,是方案的表达形式。凭借模型,可以对不同方案进行分析、计算和模拟,以获得各种方案的性能、数据和其他信息。

(5) 效果:系统达到目标所取得的成果就是效果,衡量效果的尺度是效益和有效性,效益可以用货币形式表示,有效性则是用货币尺度以外的指标来评价。对于不同方案的效果,必须使用同一种方法去估算它们,这样才能进行直接比较。

(6) 准则:准则是目标的具体化,是系统价值的度量,用以评价各种可行方案的优劣。准则必须定得恰当,而且要便于度量。

(7) 结论:结论就是系统分析得到的结果,具体形式有报告、建议或意见等。结论只有经过领导者的决策以后,才能付诸行动,发挥它的社会效益和经济效益。

系统分析伴随系统建模仿真的全过程,随着分析的问题、对象、阶段不同,所使用的具体方法也可能不相同。一般说来,系统分析的各种方法可分为定性方法和定量方法两大类。定量方法适用于系统结构清楚,收集到的信息准确,可建立数学模型等情况,例如投入产出分析法、效益成本分析法等。如果要解决的问题涉及的系统结构不清,收集到的信息不太准确,或是由于评价者的偏好不一,对于所提方案评价不一致等,难以形成常规的数学模型时,可以采用定性的系统分析方法,例如德尔菲分析法、因果分析法等。这些具体的系统分析方法也不再赘述。

11.4 系统评价与决策

11.4.1 系统评价与决策的复杂性

系统评价是对系统开发提供的各种可行方案,从社会、政治、经济、技术的观点予以综合考察,全面权衡利弊得失,从而为系统决策选择最优方案提供科学的依据。因此,系统评价是系统工程中的一项重要基础工作。系统评价问题解决以后,系统决策便是顺理成章、水到渠成的事了。为了决策,先要评价,评价是决策的准备与基础。但是,系统评价与系统决策至少有两点区别:第一,系统评价是一项技术工作,是由系统分析者承担的;而系统决策则是领导者在系统分析者的辅助下完成的。第二,系统评价是系统决策的主要依据,但是重大问题的决策往往还有“看不见的”因素在起作用,这些因素往往难以纳入评价工作之中。

当系统为单目标时,其评价工作比较容易进行,但是当系统为多目标(或指标)时,评价工作就困难得多。对于这样的复杂系统,一方面要把它分解为若干个子系统,分别建立模型,然后应用系统分析方法求得各个指标的最优解;另一方面还要把这些工作综合起来,对于一个完整的系统方案作出正确的评价,对于不同的可行方案作出谁优谁劣的比较,而且要用定量的结果来说明。这样,系统评价工作主要存在着以下两方面的困难:一是有的指标难以数量化;二是不同的方案可能各有所长,难以取舍。因此,为了搞好系统评价,要解决的问题和遵守基本原则是:

- (1) 将各项指标数量化;
- (2) 将所有指标归一化;
- (3) 保证评价的客观性;
- (4) 保证方案的可比性;
- (5) 评价指标的系统性和政策性。

系统评价的复杂性主要是评价指标体系的建立。系统评价指标体系是由若干个单项评价指标组成的整体,它应反映出所要解决问题的各项目标要求。指标体系要实际、完整、合理、科学,并基本上能为有关人员和部门所接受。

系统评价指标体系通常应该包括以下一些大类指标:

(1) 政策性指标 包括政府的方针、政策、法令,以及法律约束和发展规划等方面的要求,这对重大项目或大型系统尤为重要。

(2) 技术性指标 包括产品的性能、寿命、可靠性、安全性等,工程项目的地质条件、设备、设施、建筑物、运输等技术指标要求。

(3) 经济性指标 包括方案成本(有条件时应考虑生命周期成本,即包括制造成本、使用成本和维修成本等)、利润和税金、投资额、流动资金占用量、回收期、建设周期,以及地方性的间接收益等。

(4) 社会性指标 包括社会福利、社会节约、综合发展、就业机会、污染、生态环境等。

(5) 资源性指标 如工程项目中的物资、人力、能源、水源、土地条件等。

(6) 时间性指标 如工程进度、时间节约、试制周期等。

在制订评价指标体系时,有几个关系是必须解决的:

(1) 指标大类和数量问题 这是一个很困难的问题,有较大的处理幅

度。一般地说,指标范围较宽,指标数量较多,则方案之间的差异越明显,因而有利于判断和评价,但确定指标的大类和指标的重要程度也越困难,因而歪曲方案本质特性的可能性也越大。所以分配指标大类和确定指标的重要程度是关键。

(2) 关于各评价指标之间的相互关系问题 在制订单项指标时,一定要使指标间尽量相互独立,互不重复。例如企业费用和投资费用,折旧费用和成本,在使用中的交叉处必须明确加以划分和规定。

(3) 评价指标体系的提出和确定问题 评价指标体系的制订要求尽可能地做到科学、合理、实用,而评价指标体系内容的多样性使得要达到上述要求很困难。为了解决这种矛盾,通常使用德尔菲法,即经过广泛征求专家意见,反复交换信息,统计处理和归纳综合等达到上述要求。

常用的系统评价指标数量化方法主要有:排队打分法、体操计分法、专家评分法、两两比较法、连环比率法。将各评价指标数量化,得到各个可行方案的所有评价指标的无量纲的统一得分以后,采用评价指标综合方法进行指标的综合,就可以得到每一方案的综合评价值,再根据综合评价值的高低就能排出方案的优劣顺序。评价指标综合的主要方法有:加权平均法、功效系数法、主次兼顾法、效益成本法、罗马尼亚选择法、层次分析法、模糊综合评价方法等。

11.4.2 决策过程与决策问题

西蒙有句名言:“管理就是决策”,决策贯穿于管理的全过程,这也就是说,一切管理工作的核心就是决策。他把决策过程同现代的管理科学、计算机技术和自动化技术结合起来,将其划分为4个主要阶段:(1)调查环境,寻求决策的条件和依据,即“情报活动”;(2)创造、制定和分析可能采取的行动方案,即“设计活动”;(3)从可资利用的备选方案中选出一个特别行动方案,即“抉择活动”;(4)决策的实施与评审,西蒙称其为“审查活动”,其实质是对过去的抉择进行实施与评价。以上4个阶段交织在一起,就形成了系统决策的过程,见图11.4.1。尽管不同的决策者在不同决策场合对上述4个阶段的看法可能不一样,但这4个部分加在一起却构成了决策者所要做的主要工作。在系统工程的工作过程中,由系统开发得到的若干解决问题的方案,经过系统建模、系统分析以及系统评价等步骤之后,最终必须从备选方案中为决策者选出最佳的开发方案。这一程序是系统工程辩证程序中最后一个,也是最重要的一个,即系统决策。

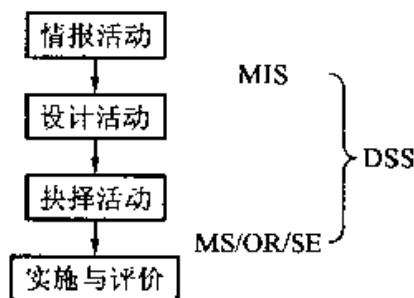


图 11.4.1 系统决策阶段与过程

现代计算机技术、管理科学等的发展,给决策制定的过程赋予了新的内容和涵义。在情报和设计阶段,主要是依赖于可靠、准确、及时的基本信息,因此管理信息系统(MIS)就成为当代决策的重要技术基础;而在抉择和评价阶段的主要技术措施就是模型方法,主要是指管理科学、运筹学、系统工程中的模型方法(MS/OR/SE)。将上述两部分技术集成在一起,利用先进的计算机软硬件技术,实现上述决策过程,开发成界面友好的人机系统,这就是决策支持系统(DSS)。从不同的角度来分析决策问题,我们可以得出不同的分类。

(1) 按决策的重要性可将其分为战略决策、策略决策和执行决策,或称为战略规则、管理控制和运行控制3个层次。战略决策是涉及到组织的发展和生存的有关全局性、长远、方向问题的决策,如企业厂址的选择、新产品开发、新市场开发,国家和地区的产业布局、结构调整、战略方针等。策略决策是为完成战略决策所规定的目标面进行的决策,如企业的产品规格、工艺方案等。执行决策是根据策略决策的要求制定执行方案的选择,如生产标准选择、生产调度、人员兵力配备等决策。

(2) 按决策的性质可将其分为程序化决策和非程序化决策。程序化决策是一种有章可循的决策,具体体现为可以重复出现,制定固定程序,如订单标价、核定工资、生产调度等。而非程序化决策表现为问题新颖、无结构,处理这类问题没有灵丹妙药,如开辟新的市场、作战指挥决策等。这一类决策根据问题结构化的程序又可将其分为结构化决策、半结构化决策以及非结构化决策。所谓结构化是指问题的影响变量之间的相互关系可以用数学形式表达,问题的结构可以用数学模型表示;非结构化问题比较复杂,一般也不能建立数学模型;介于两者之间的称为半结构化决策。

(3) 根据人们对自然状态规律的认识和掌握程度,决策问题通常可分

为确定型决策、风险型决策(统计决策)以及非确定型(完全不确定型)决策3种。如果决策者能完全确切地知道将发生怎样的自然状态,那么就可在此既定的自然状态下选择最佳行动方案,这就是确定型决策问题,如资源的分配优化、配置等,总之用数学规划解决的问题都属于确定型决策问题。如果构成一个决策问题,除满足前述的4个条件以外,还满足如下条件:未来出现哪种自然状态决策者不能准确给定,但其出现概率却可以估计出来,那么这种决策问题就称为风险型决策问题。如本节例子中,天气好、天气坏的概率可以估计出来,这一问题就属于风险型决策问题了。如果决策者不但不能确定未来将出现哪一种自然状态,甚至对于各种自然状态出现的概率也一无所知,也没有任何统计数据可循,全凭决策者的经验、态度和打算,这类决策问题就是非确定型决策问题。

(4) 按决策的目标数量可将其分为单目标决策和多目标决策。仅有一个目标的决策问题是单目标决策,有两个或两个以上目标的决策问题称为多目标决策。

(5) 按决策的阶段可将其分为单阶段决策和多阶段决策,也可称为单项决策和序贯决策。单项决策是指整个决策过程只作一次决策就得到结果,序贯决策是指整个决策过程由一系列决策组成,而其中若干关键决策环节又可分别看成单项决策。

11.5 应用实例

11.5.1 宏观经济智能决策支持系统的研究和开发⁹

由于决策的需要,受中央有关部门的委托,在国家863智能计算机组的支持下,中国航天工业总公司710所、中国科学院自动化所、华中理工大学系统工程研究所三方联合进行了宏观经济智能决策支持系统(MEIDSS)的研究和开发。实际运行表明,这个系统的开发是成功的。作为综合集成方法应用和探索的实例,下面作些简单介绍。

11.5.1.1 MEIDSS 结构

MEIDSS 是用于支持宏观经济决策,为决策者或决策部门把握经济发展状态,预测经济发展趋势,监测经济系统运行和规划经济发展,为决策部门提供决策定量参考。因此,MEIDSS 将宏观经济的预测、监测、规划和评价作为系统的基本设计要求,同时,对一些特定经济问题,如通货膨胀、投资过热、养老保险、居民收入等专题,也能灵活地建模、仿真分析与综合集成,给

出决策参考。

MEIDSS 是根据从定性到定量综合集成方法进行设计的。它是一个人机结合系统,以人为主,人、机智能互补,有效利用智能技术以形成“人帮机、机帮人”的智能决策支持。

MEIDSS 结构从大的方面来说,由专家体系和机器体系构成。专家体系包括经济专家、管理专家、系统工程专家、计算机专家等;机器体系是由计算机软、硬件构成的计算机系统,它的第一个层次由模型体系、知识体系、信息体系、评价体系、方法体系构成,第二个层次是支持这5个体系的软件工具。

模型体系包括年度经济预测模型、月度经济预测和监测模型、经济规划模型、经济评价模型、面向问题的专题模型(物价和金融模型、居民收入分布模型等)。模型体系内各模型之间既有关联性,又有一定开放性和扩展性,能根据宏观经济研究的要求,进行适当组合、集成或扩充。

知识体系中有知识开发环境、仿真决策集成环境和可视建模3个子系统,其中仿真决策集成环境在于将问题描述转变为系统定性描述,并能部分地转变为定量模型。而可视建模系统通过对建模过程形象化的描述,能帮助使用者正确描述经济系统特征,同时让模型的描述与辨识过程分离,从而为研究系统行为提供有效工具。在知识开发环境中,各种问题求解模型通过知识描述被统一封装在方法库中。知识系统从一种问题求解模型被提升到介于问题求解方法和专家体系之间中央控制单元,即不但要承担一般的问题求解任务,而且要承担大部分的问题求解规划与控制,系统通过状态变量在数据库、知识库和方法库之间形成动态关系,并且通过各种接口实现各种智能技术的融合。

信息体系是支持建模、仿真、评价、分析和知识规则的,它包括大量国民经济统计数据,如:

- (1) 有关生产、投资、物价、劳动力、收入分配、外贸外资金融财政、税收等方面的年度和月度统计数据。
- (2) 投入产出表数据。
- (3) 人口年龄结构数据。
- (4) 居民收入消费抽样调查数据。
- (5) 行政区划和自然资源数据。
- (6) 有关评价指标体系和方法体系数据。

这样大的数据量在 MEIDSS 中用综合信息管理子系统对其进行管理和维护,它使用相关信息自动检索技术来完成信息的搜集和管理。

评价体系包括评价指标体系和评价方法。评价指标体系根据问题性质而有不同,有预测结果的评价、方案评价等,实现这些评价的方法有层次分析法 AHP 以及模糊 AHP,基于专家评分的德尔非法,还有神经网络法。评价体系对实现从定性到定量过程的收敛速度,具有重要意义。

方法体系包括计量经济方法、投入产出方法、时间序列分析方法、GMDH(Group Method Data Handling)方法、神经网络方法等。

支持和管理以上 5 个体系的软件工具是:张量处理器、仿真决策集成环境、可视建模、综合信息管理子系统。张量处理器是一个定量计算系统,具有数据分析、建模、模型管理与运行的功能,还可将计算结果用多种(表、图、立体图等)方式输出。仿真决策集成环境可对定性的经济问题进行分析,并通过分析为经济模型进行情景设定、模型运行、评价模型、输出结果。可视建模是模型的图形化工具,在可视模型上可将模型用方框图等多种方式表现出来,并和张量处理器结合完成模型从定性到定量的转化过程,以及运行定量化的模型等。综合信息子系统可对数据库中的信息(包括统计信息和模型的运算结果)以多种方式输出,并可对信息进行静态和动态分析。这几个软件通过知识库、模型库、数据库、方法库连接起来,构成一个既有相对独立性又有有机联系,既各有特色又功能互补的系统集成。

为了便于专家体系和机器体系之间的交互作用,系统设计了多个入口点。可视建模、仿真决策集成环境中的面向问题方面和模型管理方面、综合信息管理系统中的图文信息和信息管理以及评价体系都可直接面向专家体系,以适应不同类型专家的不同要求。

11.5.1.2 MEIDSS 运行

整个系统运行方式有两种,即离线方式和在线方式。

系统的软件环境是 Windows for Workgroup 3.11,并将系统装配成客户机/服务器网络结构,具有配置灵活、易扩充、可靠性强、易维护的特点,还可进一步与远端联网,高速传递数据和共享数据资源等。

在研制开发这个系统之前,研究经济系统时的工作流程可用图 11.5.1 表示:

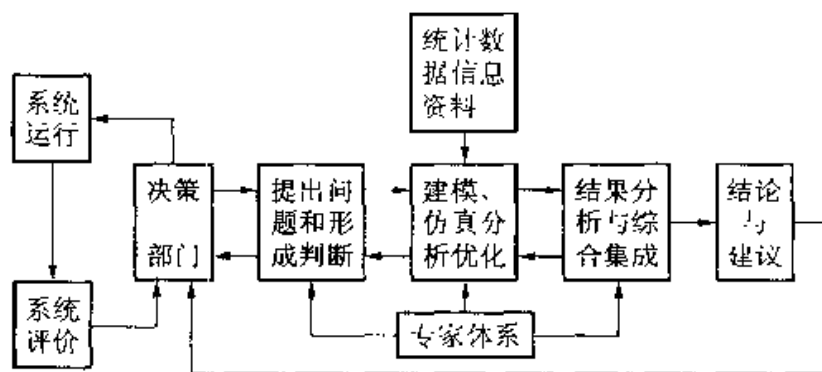


图 11.5.1 从定性到定量综合集成方法工作程序

从这个过程可以看出,它体现了从定性到定量综合集成方法。在社会经济系统研究中,如“财政补贴、价格、工资综合研究”以及“国民经济发展预测和政策模拟”等项目中,应用是很有效的。但这里较多地用到了计算机在建模、仿真、分析和优化中的作用,其他方面的功能尚未充分发挥出来,人机结合的优势也未能充分体现出来。

MEIDSS 的开发在机器体系的功能上大大加强了,这就更便于人机结合,以人为主进行知识的综合集成,实现从定性到定量认识的水平上提高了一步。当然我们也要指出,MEIDSS 开发的成功,也仅仅是个开端,计算机技术、人工智能技术、网络技术 etc 发展很快,这些技术的发展必将推动人机结合的智能系统的发展,从而也就越能发挥出从定性到定量综合集成方法的威力,特别是“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的建立,将具有更加重大的意义。

11.5.2 洞庭湖治理问题的研究¹⁰

洞庭湖正处在由盛至衰的急剧演变过程中,这一过程的继续使湖泊日益萎缩和逐步消亡,同时也给湖区带来一系列自然、生态和社会经济问题。因此,洞庭湖要解决的首先是治理问题。洞庭湖的治理开发同湖区人民的生命财产息息相关,并且还直接影响着荆江北岸、江汉平原的前途和命运,这是关系长江流域全局的大事。由于应用实例篇幅所限,没有考虑长江三峡大坝建成后对洞庭湖的影响,只就洞庭湖本身的治理问题,应用系统工程理论、方法加以研究。

11.5.2.1 系统存在的问题

洞庭湖位于荆江南河畔,江湖贯通,互相影响,互相制约。洞庭湖对长江起巨大的调蓄洪水作用,而长江则影响着洞庭湖的演变和发展。由于森

林覆盖率不断减少,森林植被破坏严重,长江和湖南省境内的湘、资、沅、澧“四水”带来的泥沙增多,同时洞庭湖区的自然地理特征和水文要素极有利于泥沙落淤。所以泥沙淤积有增无减,导致河床湖底不断淤塞抬高,泄洪流量和调蓄容积逐年减小,调蓄功能不断萎缩,洪水威胁和所造成的损失愈益严重。更为危险的是,若荆江洪峰与“四水”来水量过大,而荆江下游由于壅阻严重,泄洪量小,从而导致大量的超额洪水泄入洞庭湖,将会给工农业生产和人民财产造成重大损失,后果不堪设想。

11.5.2.2 系统的研究目标

模型研究的总目标,就是从整体上研究比较各种工程和非工程措施,对延长湖泊寿命,增强调蓄功能,减少洪水危害的作用。具体研究的内容有:

(1) 研究在“四水”、长江上游植树造林和种草,提高森林覆盖率,减少水土流失,对于延长湖泊寿命的作用。

(2) 研究“四水”上游建设控制性水库对削减、减轻洪水压力的作用。

(3) 研究在松滋口建闸、控制入湖流量,对减少泥沙淤积的作用,以及在“四水”洪峰时期关闭闸门或调节闸门大小对减轻洪水压力的作用。

(4) 研究在城陵矶至毛螺山疏挖泥沙,提高出湖泄量,对减少湖内底水,提高可调蓄容积,削减洪峰滞留时间,减轻洪水危害的作用。

(5) 研究加高加固堤坝,用挖泥船疏挖泥沙,填塘固基,提高标准大堤比例对减轻洪水危害和减少灾害损失的作用。

(6) 综合研究以上各种工程和非工程措施,对于延长湖泊寿命,提高湖泊调蓄能力,削减洪水水位,减轻洪水压力,减少灾害损失的综合作用。

在评价各种政策方案时,主要以下列指标进行比较:泥沙淤积量、调蓄容积、最高洪水位、灾害损失等。

11.5.2.3 系统分析结果

(一) 系统结构分析

涌入洞庭湖的洪水主要来自“四水”和长江“三口”,同时由于“四水”和长江上游森林植被破坏严重,水土流失严重,来水挟带大量泥沙。入湖后又由于洲土、芦苇等阻水障碍物的作用,致使水系混乱,水流速度缓慢,加速泥沙淤积,每年形成大片洲土。加上对洲土的不适当围垦,导致调蓄容积骤减,湖泊调蓄能力萎缩,湖区洪涝灾害越来越频繁。

防洪的指导思想是以泄为主,调蓄兼顾,在充分发挥现有河道泄洪能力的基础上,采取措施蓄纳超额洪水。为提高洪水的泄量,一方面疏挖泥沙,

扩展洪道,拆除阻水障碍物,这对湖内局部地段洪水畅泄极有好处;另一方面,必须提高出湖泄量,使洪水及时排除出湖外,这又受长江下流的阻水作用,因此需实施下荆江的截弯取直。

湖泊对洪水的可调蓄量主要由湖内底水和湖泊绝对容积决定。为提高湖泊调蓄能力,必须投资加高加固堤坝,提高标准大堤比例,投石护坡以增加局部抗洪能力,从而相对地增加了湖区整体的抗洪能力,减少人民和国家的财产损失,进一步发展生产力,提高修堤的积极性。

为在洪水遭遇频繁的季节,削减洪峰,减轻洪水压力和减少入湖泥沙,需兴建控制性水库,在松滋口建闸,进行合理的调度。将上述问题用系统结构图表示,如图 11.5.2 所示。

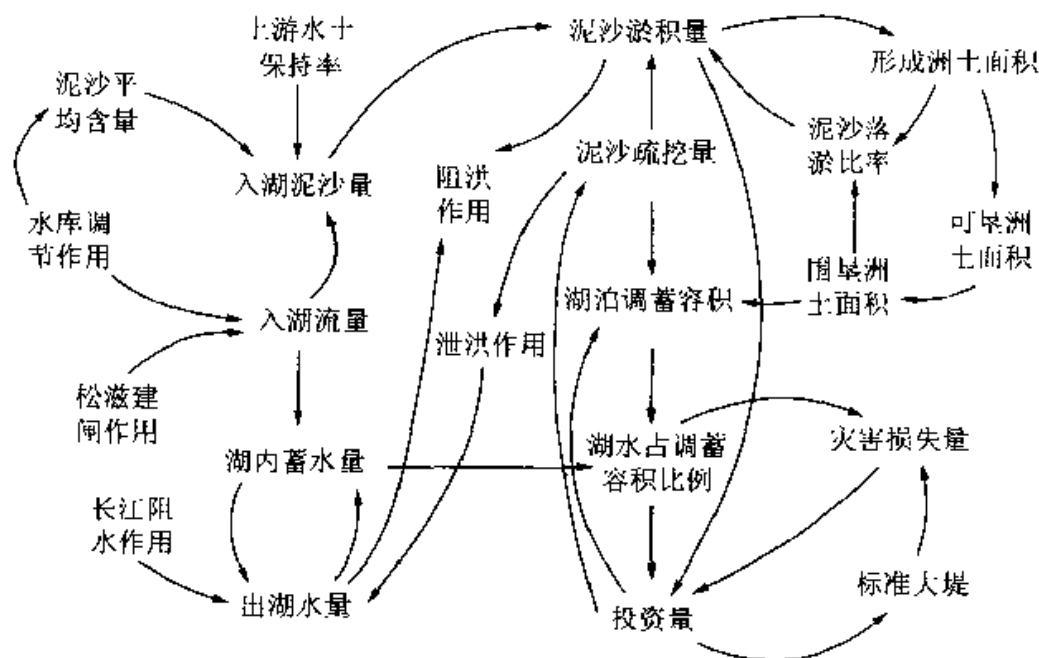


图 11.5.2 系统结构图

(二) 系统行为分析

(1) 系统存在问题是否得到反映。洞庭湖调蓄功能不断降低的一个重要方面是出湖洪水的排泄不畅,湖口的泄量和“四水”、“三口”的洪水来量极不适应,反映在系统行为中就是 80 年代相对来说还是平水年,但洪水威胁所造成的损失却是巨大的。进入 80 年代的头 3 年,洪水水位都有明显上升的趋势,结果分析反映出来的问题和客观存在的问题比较一致。

(2) 过去的政策是否得到反映。在洞庭湖演化过程中,围垦洲土造田

是非常严重的事件,在模型中对此作了反映,虽然现已禁止围垦,但经过转换可以使它反映退田还湖这一政策。

(3) 所预测的行为是否出现。如果进行围垦,而不加限制的话,则从分析结果可以看出调蓄容积减少的幅度比较大。在相同洪水来量的情况下,洪水水位普遍升高,引起的损失量相应增加,这也和预计的行为相符。

(4) 参数的灵敏性分析。主要是用来评价各种治理政策和措施。由于原始数据资料缺乏和数据不精确,因此模型中的参数有可能不精确。在这种情况下,一个重要的问题就是如何避免由于参数值的误差而得出错误的结论。

(三) 洞庭湖治沙战略

(1) 在“四水”上游植树造林和种草,提高森林覆盖率,进行水土保持,减少入湖泥沙。

(2) 在长江上游植树造林和种草,提高森林覆盖率,进行水土保持,修建分散型水库,减少长江泥沙来量。

(3) 在松滋口建闸后,减少泥沙淤积总量,减轻洪水威胁。

(4) 提高挖泥船投资比例,疏通洪道,加速水流速度,减少泥沙平均落淤率,并采取用洲土烧砖、挖湖抬田、取肥于湖等措施。

通过以上4种主要治沙政策的实验,可以看出它们对延缓湖泊寿命的作用。“四水”上游采取植树造林的政策后,泥沙淤积总量为23.878亿吨;长江上游采取植树造林的政策后,泥沙淤积总量为19.311亿吨;采取松滋口建闸的政策后,泥沙淤积总量为21.098亿吨;采取提高挖泥船疏挖量,减少泥沙平均落淤率政策后,泥沙落淤总量为22.685亿吨。它们比没有采取任何措施的泥沙淤总量分别减少2.264亿吨、6.831亿吨、5.044亿吨、3.457亿吨。

由此可以看出,长江上游采取植树造林,减少水土流失,对延缓洞庭湖的寿命效果最佳。其次,是松滋口建闸。但是由于植树造林的周期很长,因此,作为短期效果较好的方案,宜采取松滋口建闸的政策,而把长江上游植树造林作为一项长期的战略任务。此外,松滋口建闸还有助于减少湖洪水量,减轻洪水压力,减少灾害压力。如采取这两项综合措施,则既兼顾了短期目标,又考虑了长远目标,效益将非常明显。从表11.5.1可以看出:灾害损失量比没采取措施时减少2.755亿元,洪水水位相对各个时期分别降低0.764米、0.931米、1.672米。采取这一措施后,调蓄容积在第三期减少的

幅度与第二期相持平,湖泊调蓄功能萎缩得到制止。同时洪水水位与不采取措施前相应时期相比,降低的幅度不断增大,洪水威胁得到进一步的缓和。

(四) 洞庭湖治水战略

(1) 在“四水”上游修建江垭、皂市水库,沅水上游修建五强溪水库,削减洪峰,减轻灾情。

(2) 重视修筑防洪堤坡,提高标准大堤比例,减轻灾害损失。

(3) 城陵矶到毛螺山段疏挖泥沙,提高出湖泄量,削减洪峰。

(4) 松滋口建闸,调节入湖水量,削减洪峰。

表 11.5.1 综合治沙方案

项目	第一时期 (1975 ~ 1982 年)	第二时期 (1983 ~ 1990 年)	第三时期 (1991 ~ 1998 年)	总量
泥沙增加量(亿吨)	5.246	5.397	5.441	16.084
损失年增加量(亿元)	1.1767	1.1586	1.8886	
容积减少量(亿立方米)	3.54	3.74	3.74	(到 273.98)
最高洪水位(米)	32.971	33.190	34.849	

通过以上 4 种主要治水政策的实验可以看出,加固堤坝,提高标准大堤比例,对减少洪水造成的灾害损失有较明显的效果,但无助于降低洪水水位,需作为一项长期战略加以实施。

其余 3 项治水政策中,在松滋口建闸,对削减洪峰水位,减少灾害损失效果最佳;其次是在城陵矶至毛螺山段疏挖泥沙,提高出湖泄量;最后是“四水”上游修建控制性调蓄水库。

以上讨论了实施各种单项治水、治沙措施后,可起到减轻洪水压力、延缓湖泊寿命的作用。下面将以上各项措施综合起来进行仿真实验,仿真结果如表 11.5.2 所示。与不采取任何新的治理措施的仿真结果相比,泥沙淤积总量减少 14.302 亿吨,调蓄容积增加 9.5 亿立方米,灾害损失量平均减少 5.3381 亿元;同时期最高洪水水位分别降低 1.944 米、2.282 米、3.011 米。

表 11.5.2 综合治理方案

项目	第一时期 (1975 ~ 1982 年)	第二时期 (1983 ~ 1990 年)	第三时期 (1991 ~ 1998 年)	总量
泥沙增加量(亿吨)	3.9173	3.9599	3.9628	11.840
损失年增加量(亿元)	0.8246	0.3565	0.4597	
容积减少量(亿立方米)	2.67	2.73	2.74	(到 276.86)
最高洪水位(米)	31.771	32.839	33.510	

由此可以看出采取综合治理的战略方针对延缓湖泊寿命,减轻洪水威胁,减少灾害损失量效果显著,但需要大量人力、物力和财力。因此,对各项治理措施必须分清主次,既考虑长远,又照顾近期,既治标,又治本。

结 语

本书的基本内容是阐述系统科学的基础理论。阐述的框架是按“横”“纵”两个方面展开的。

“横”的方面是各类系统均具有的性质和规律,我们阐述了动态理论、随机性理论和自组织理论(第3章至第6章)。我们虽尽了一定的努力,但动态理论基本上未脱掉非线性动力学框架,随机性理论未脱掉应用数学随机过程的框架,作为系统科学理论的特色还不明显。自组织理论,成为系统科学基础理论的基本内容,已是国内外系统科学界的共识,但如何有效应用于生物、社会等复杂系统,仍是学术界的努力课题,本书尚未能反映这方面的突破性成果。至于把自组织和“他组织”以及“内外因”联系起来的诠释,说法不一,本书的阐述还只能是“一家之言”。

“纵”的方面,我们按从简单到复杂,把系统分成三大类(也可以说分成三大层次),每一类的系统,其最基层的组成成分(元素)具有不同本质特征。第一类,大体是无机界物质系统;第二类,大体是生物系统;第三类,大体是人类系统。我们阐述了三种有代表性的系统理论。简单巨系统理论,由于非线性科学和自组织理论的进展,使得对这类系统的描述,有了比较科学的定量分析的基础,本书的阐述从概念、理论到方法,也比较有系统科学的特色。复杂适应系统理论是当前在国内外有重大影响美国圣菲研究所研究复杂系统有代表性的成果,第8章已具体分析了它的特点和不足。开放的复杂巨系统理论,是我国学者提出的具有超前意义的研究成果,但正如其提出者所说,“开放的复杂巨系统目前还没有相应的理论,但有了上述方法论(指从定性到定量综合集成方法论——引者注),我们就可以逐步建立起开放的复杂巨系统理论”,“要建立开放的复杂巨系统一般理论,必须从一个一个具体的开放的复杂的巨系统入手,只有这样,这些研究成果多了,才能从中提炼出一般的开放的复杂巨系统理论”¹。这是十分艰巨而意义重大的任务,需要我们坚持不懈努力。

需要提出的是,第10章“技术科学层次的系统科学”,限于篇幅和时间,未能作更全面的提炼。如,在信息论方面,当前关于信息处理已经取得基础

理论层次的进展,这就是物理符号系统理论和连接主义理论,以及两者相辅相成的结合理论,本书对这些内容未及阐述。

关于系统科学基础理论的这个“横”“纵”体系框架,经在全国范围广泛征求意见,得到认可,我们认为是很重要的,必将有利于在一定时期内各方面的研究形成共识。

系统科学作为一门新兴的综合性学科,从局部和整体的关系上,研究各类事物的结构、性质、功能和演化的共性规律,经过半个多世纪的发展,目前对各门学科乃至社会产生了重大影响,下面两件事充分说明了这一点:

第一件事是,研究复杂性成了当前各门学科的前沿和热点。虽然目前对复杂性的看法,还处于众说纷纭,但和系统科学有密切关系是明显的。圣菲研究所的首任所长考恩在 1994 年的一次学术会议上对复杂性研究的来龙去脉作过简要的叙述。他从 1928 年贝塔朗菲的论文说起,历数了做出实质性贡献的人和著作,其中主要的几位,如贝塔朗菲、维纳、普利高津、哈肯都是系统科学的先驱和主要代表人物,他所叙述的复杂性研究的来龙去脉,也可以说是系统科学发展的基本历程²。从系统科学来说,“复杂性是开放的复杂巨系统的动力学特性”³指明了复杂性研究的实质和核心内涵。可以说,复杂性研究的进一步发展,也就是系统科学进一步的深化。

第二件事是,美国科学院于 1996 年公布了美国历史上第一部《美国国家科学教育标准》(以下简称“标准”)。我们在绪论中曾引述了该书中关于系统概念的内容。这件事对于系统科学学科的发展意味着什么呢?

这个“标准”中的科学内容标准,先对从幼儿园到 12 年級的 13 年提出一个“统一的概念和过程”,然后按 3 个年龄段(幼儿园到 4 年级、5~8 年级、9~12 年级),分 7 个方面提出具体要求,这 7 个方面是:作为探究的科学、物质科学、生命科学、地球与空间科学、科学与技术、从个人和社会视角所见的科学、科学的历史和本质。特别值得我们注意的是“统一的概念和过程”的具体内容:

内容标准:由于从幼儿园至 12 年級的教学活动,所有的学生都应该培养与下述概念和过程相关的理解力和能力:系统、秩序和组织;证据、模型和解释;不变性、变化和测量;演变与平衡;形式和功能。

接着“标准”对上述概念作了规范性的诠释⁴。

可以看出,这些内容基本上也就是系统科学的基本概念。我们都知道,关于中小学生应知应会的科学概念,是有关学科被公认的最成熟的概念,是

对科学的发展最具有价值的概念。系统科学的基本概念被“标准”作为贯穿13年的“统一的概念和过程”,意味着已经提炼明确的系统科学概念,已被公认为是近现代科学最具有综合性的概念,是对今后科学的发展最具重要性的基础概念。

这件事使我们清楚看到科学界、教育界对系统科学成就的高度评价,对系统科学在今后科学技术发展中重要地位的高度重视。

在即将到来的21世纪,研究和发展系统科学的内容和体系有着巨大的意义。

注释与参考文献

第1章 绪论

1. 钱学森,王寿云. 系统思想和系统工程. 见:钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 73~86
2. 恩格斯. 路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结. 马克思恩格斯选集(第四卷). 北京:人民出版社,1995. 246
3. 恩格斯. 路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结. 马克思恩格斯选集(第四卷). 北京:人民出版社,1995. 245
4. 普朗克. 世界物理图景的统一性. 转引自:黎鸣. 试论唯物辩证法的拟化形式. 中国社会科学,1981,(3):6
5. (美)冯·贝塔朗菲. 一般系统论:基础、发展和应用. 林康义、魏宏森译. 北京:清华大学出版社,1987
6. (美)摩特 J J, 爱尔玛拉巴 S E. 运筹学手册. 王毓云等译. 上海:上海科学技术出版社,1987
7. (美)维纳 N. 控制论. 郝季仁译. 北京:科学出版社,1963
8. (美)申农 E. 通信的数学理论. 沈永朝译. 见:庞元正、李建华编. 系统论控制论信息论经典文献选编. 北京:求实出版社,1989. 508~600
9. 戴汝为. 智能系统的综合集成. 杭州:浙江科学技术出版社,1995
10. 宋健. 自动控制与系统工程. 中国大百科全书. 北京:中国大百科全书出版社,1991
11. 尼科利斯 G, 普里戈京 I. 非平衡系统的自组织. 徐锡申等译. 北京:科学出版社,1986
12. 哈肯 H. 协同学引论. 徐锡申等译. 北京:原子能出版社,1984
13. 艾根 M, 舒斯特尔 P. 超循环论. 曾国屏、沈小峰译. 上海:上海译文出版社,1990
14. 托姆 R. 结构稳定性与形态发生学. 赵松年等译. 成都:四川教育出版社,1992
15. 谷超豪. 什么是非线性科学. 见:甘子钊等. 中国十大基础科学研究. 上海:上海科学技术出版社,1995. 276~287
16. 朱照宣等. 非线性物理导论. 北京:北京大学非线性科学中心,1992
17. Zhu Zhaoxuan. Systematology and Nonlinear Dynamics. 见:系统学理论与应用——第一届系统学学术交流会论文集. 上海机械学院学报. 1990, 13(增1): 4~8. 中文文本

见:中国科学院《复杂性研究》编委会. 复杂性研究. 北京:科学出版社,1993. 11~16

18. 尼科里斯 G, 普利高津 I. 探索复杂性. 罗久里、陈奎宁译. 成都:四川教育出版社,1986

19. 哈肯 H. 高等协同学. 郭治安译. 北京:科学出版社,1989

20. Waldrop M M. Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. New York: Simon and Schuster, 1992

21. 霍兰 J H. 隐秩序. 周晓牧等译. 上海:上海科技教育出版社, 2000

22. Holland J H. Emergence. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1998

23. Gallagher R, Appenzeller T. Beyond Reductionism. Science. 1999, 284(5411): 79

24. 中国系统工程学会成立十五周年纪念特辑. 北京:中国系统工程学会,1995

25. 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程. 见:钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 7~27

26. 王寿云, 于景元, 戴汝为, 汪成为, 钱学敏, 涂元季. 开放的复杂巨系统. 杭州:浙江科学技术出版社,1996

27. 我国社会科学界自 80 年代以来,对系统科学开展了广泛的研究活动,取得了多方面的成果,如:刘长林. 中国系统思维. 北京:中国社会科学出版社,1990;魏宏森,曾国屏. 系统论——系统科学哲学. 北京:清华大学出版社,1995;湛垦华. 系统科学的哲学问题. 西安:陕西人民出版社,1995;邹珊刚等. 系统科学. 上海:上海人民出版社,1987.

多年来,各方面的学者对系统科学的基础理论进行了有意义的探索,如:朴昌根. 系统学基础. 成都:四川教育出版社,1994;颜泽贤等. 复杂系统演化论. 北京:人民出版社,1993;陈禹. 关于系统的对话. 北京:中国人民大学出版社,1989;周硕愚. 系统科学导引. 北京:地震出版社,1988;杨士尧. 系统科学导论. 北京:农业出版社,1986;周曼殊. 改革、开放与复杂系统. 长沙:国防科技大学出版社,1990;苗东升. 系统科学精要. 北京:中国人民大学出版社,1998;谭跃进等. 系统学原理. 长沙:国防科技大学出版社,1996;姜璐. 熵:系统科学的基本概念. 沈阳:沈阳出版社,1997.

20 多年来,在大量实践的基础上,出版了一批运筹学和系统工程的专著和教材,被广泛采用的,如:李德,钱颂迪等. 运筹学. 北京:清华大学出版社,1982;陈珏. 决策分析. 北京:科学出版社,1987;王众托. 系统工程引论. 北京:电子工业出版社,1985;汪应洛. 系统工程. 北京:机械工业出版社,1986;孙东川等. 系统工程简明教程. 长沙:湖南科学技术出版社,1987;夏绍玮,杨家本,杨振斌. 系统工程概论. 北京:清华大学出版社,1995;刘豹,寇纪淦. 能源系统工程. 北京:机械工业出版社,1991.

28. 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志,1990,(1): 3~10

29. 哈肯 H. 系统科学大辞典序言. 见:许国志主编. 系统科学大辞典. 昆明:云南科学技术出版社,1994

30. 哈肯 H. 协同计算机和认知. 杨家本译. 清华大学出版社, 广西科学技术出版社, 1994
31. 钱学森. 大力发展系统工程尽早建立系统科学的体系. 见: 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988. 173 ~ 188
32. 钱学森. 系统工程和系统科学的体系. 见: 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988. 532 ~ 553
33. 许国志主编. 系统研究. 杭州: 浙江教育出版社, 1996. 311
34. (美)国家研究理事会. 美国国家科学教育标准. 戴守志等译. 北京: 科学技术文献出版社, 1999. 140 ~ 141
35. 陈天机等. 系统视野与宇宙人生. 香港: 商务印书馆, 1999
36. 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统. 模式识别与人工智能, 1991, (1): 1 ~ 4
37. 中国科学院《复杂性研究》编委会. 复杂性研究. 北京: 科学出版社, 1993
38. 成思危主编. 复杂性科学探索. 北京: 民主与建设出版社, 1999
39. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988
40. 许国志. 诸侯分治统一江山. 科学时报, 1999 - 11 - 11(4)

第2章 基本概念与方法

1. Bertalanffy von. General System Theory. New York: George Braziller, Inc. 1973. 33
2. Bak P, Chen V. Self-organized Criticality. Scientific American, 1991, 264(1): 46 ~ 53
3. 汉语“整合”的应用日渐增多, 应用范围亦大为扩展, 如 1999 年版《辞海》“整合”条目释文已增加了新意。本书行文中的“整合”除上述释文的涵义, 还有结合、耦合、融合等的词义, 以及把诸多差异的东西整理、安排、集成为一个统一体的含义。汉语“整合”的涵义正在使用中发展丰富。
4. 西蒙 H. 人工科学. 武夷山译. 北京: 商务印书馆, 1987. 167 ~ 168
5. Holland J H. Emergence. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1998
6. 钱学森. 序. 工程控制论(修订版). 北京: 科学出版社, 1983
7. Beer S. Cybernetics and Management. John Wiley & Son, Inc., 1959. 7
8. 朱志昌. 当代西方系统方法论经典文献目录汇编. 系统工程理论与实践, 1999, 19(10): 130 ~ 144
9. Bertalanffy von. The History and Status of General System Theory. In: Klir G J. ed. Trends in General System Theory. John Wiley & Son, Inc. 1972. 21 ~ 41
10. (美)迈尔斯 F 主编. 系统思想. 杨志信等译. 成都: 四川人民出版社, 1986. 350
11. 普利高津 I. 确定性的终结. 湛敏译. 上海: 上海科技教育出版社, 1998. 145
12. 哈肯 H. 协同学. 杨炳奕译. 北京: 中国科学技术出版社, 1990. 11
13. 钱学森. 人体科学与当代科学技术发展纵横观. 北京: 人民出版社, 1996. 335

14. 普利高津 I. 确定性的终结. 湛敏译. 上海:上海科技教育出版社,1998. 49
15. 托姆 R. 突变论. 周仲良译. 上海:上海译文出版社,1989. 202
16. 卡斯蒂 J. 虚实世界. 王千祥等译. 上海:上海科技教育出版社,1998. 16~21

第3章 连续动态系统

1. 动力学早期文献的定态仅指平衡态(不动点),现今许多学者仍坚持这一用法;但不少学者已在更广泛的意义上使用这一概念,把周期态、混沌态等相空间的极限集合也当作定态。我们取后一用法。全国自然科学名词委员会《物理学名词》(1996)把定态定义为“不随时间改变的运动状态”(运动状态不同于状态空间每个点代表的状态),并把周期运动作为一种定态。

2. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 245
3. 桑德斯 P T. 灾变理论入门. 上海:上海科学技术文献出版社,1983. 22
4. 普利高津 I. 确定性的终结. 湛敏译. 上海:上海科技教育出版社,1998. 54~55
5. 托姆 R. 突变论. 周仲良译. 上海:上海译文出版社,1989. 106
6. 郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其他. 物理学进展,1983,3(3):364
7. Strogatz S H. Nonlinear Dynamics and Chaos: with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering. Addison-Wesley Publishing Company, 1994. 242
8. Thompson J M T, Stenmit H B. Nonlinear Dynamics and Chaos: Geometrical Methods for Engineers and Scientists. John Wiley and Sons Ltd., 1986
9. 哈肯 H. 高等协同学. 郭治安译. 北京:科学出版社,1989
10. Jackson E A. Perspectives of Nonlinear Dynamics. Cambridge University Press, 1990

第4章 离散动态系统

1. David C. Introduction to Dynamic Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1979. 155~157
2. Guckenheimer J, Holmes P. Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcation of Vector Fields. Springer-Verlag, 1983
3. 朱照宣. 非线性力学讲义. 北京大学力学系, 1987
4. Wolfram S. Universality and Complexity in Cellular Automata, Physica D, 1984, 10(1): 1~35
5. Forrest S, ed. Emergent Computation. Cambridge: MIT Press, 1991
6. Langton C G. Life at the Edge of Chaos. In: Langton C G, et al., ed. Artificial Life II, New York: Addison-Wesley, 1992
7. Langton C G. Studying Artificial Life with Cellular Automata. Physica D, 1986, 22: 120~149

8. Kauffman S A. Principles of Adaptation in Complex System. In: Stein D L, ed. Lectures in the Sciences of Complexity. New York: Addison-Wesley, 1989
9. Kauffman S A. The Origins of Order. Oxford: Oxford University Press, 1993
10. Cohen M A, Grossberg S. Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, SMC-13(5): 815 ~ 926
11. Degen H, Holden A, and Olsen L, eds. Chaos in Biological Systems. New York: Plenum, 1987
12. Clark J W. Introduction to Neural Networks. In: Proto A N, ed. Nonlinear Phenomena in Complex Systems. North-Holland: Elsevier Science Publishers, 1990
13. Prusinkiewicz P, Hanan J. Lindenmayer Systems, Fractals and Plants. Berlin: Springer-Verlag, 1989

第5章 系统的随机性

1. 周曼殊. 改革、开放与复杂系统. 长沙:国防科技大学出版社, 1991
2. 吴大进, 曹力, 陈立华. 协同学原理和应用. 武汉:华中理工大学出版社, 1990
3. 谭跃进, 高世楫, 周曼殊. 系统学原理. 长沙:国防科技大学出版社, 1996
4. Alan E G, Crayton C W. Ensemble Modeling: Inference from Small-scale Properties to Large-scale Systems. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc. 1984

第6章 系统的自组织

1. 毛泽东. 矛盾论. 见:毛泽东选集(第一卷). 北京:人民出版社, 1991. 302
2. Haken H. Synergetics: An Introduction. Springer-Verlag, 1977. 7
3. (比)尼科利斯 G, 普里戈金 I. 非平衡系统的自组织, 徐锡申等译. 北京:科学出版社, 1986
4. (比)普里戈金 I. 从存在到演化. 曾庆宏等译. 上海:上海科学技术出版社, 1986
5. (比)尼科利斯 G, 普利高津 I. 探索复杂性. 罗久里等译. 成都:四川教育出版社, 1986
6. (比)普里戈金 I, 斯唐热 I. 从混沌到有序. 曾庆宏等译. 上海:上海译文出版社, 1987
7. 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构. 北京:清华大学出版社, 1986
8. 宋毅, 何国祥. 耗散结构论. 北京:中国展望出版社, 1986
9. (德)哈肯. 协同学. 戴鸣钟译. 上海:上海科学普及出版社, 1988
10. (德)哈肯. 协同学. 杨炳奕译. 北京:中国科学技术出版社, 1990
11. (德)哈肯. 信息与自组织. 郭治安等译. 成都:四川教育出版社, 1988

12. Fang F K, Sanglier M, eds. Complexity and Self-organization in Social and Economic Systems. Springer-Verlag, 1997
13. 黄润荣,任光耀. 耗散结构与协同学. 贵阳:贵州人民出版社, 1988
14. 魏宏森等. 开创复杂性研究的新学科. 成都:四川人民出版社, 1991
15. 沈小峰,胡岗,姜璐. 耗散结构论. 上海:上海人民出版社, 1987. 90
16. 哈肯 H. 高等协同学. 郭治安译. 北京:科学出版社, 1987. 35
17. 哈肯 H. 高等协同学. 郭治安译. 北京:科学出版社, 1987. 187

第7章 简单巨系统

1. 复旦大学编写组. 概率论(第一册). 北京:人民教育出版社, 1979. 184
2. Jiang L. Economic Entropy and Its Application to the Structure of the Transport System. Quality & Quantity: International Journal of Methodology, 1996, 30(2): 161 ~ 171
3. 姜璐. 熵——系统科学的基本概念. 沈阳:沈阳出版社, 1997
4. (比)尼科利斯 G, 普里戈京 I. 非平衡系统的自组织. 徐锡申等译. 北京:科学出版社, 1986
5. Hanusse M P. C. R. Acad. Sci. Ser. 1972, C274: 1245
6. Tyson J, Light J. J. Chem. Phys. 1973, 59: 4164
7. Haken H. Synergetics: An Introduction. Springer-Verlag, 1977. 226
8. 王竹溪. 统计物理学导论. 北京:人民教育出版社, 1955
9. 祖巴列夫. 非平衡统计热力学. 李沅柏等译. 北京:高等教育出版社, 1982
10. (比)尼科利斯 G, 普里戈京 I. 非平衡系统的自组织. 徐锡申等译. 北京:科学出版社, 1986
11. 哈肯. 高等协同学. 郭治安译. 北京:科学出版社, 1989
12. 黄安基. 非线性振动. 重庆:西南交通大学出版社, 1993
13. Puccia C J., Levins R. Qualitative Modeling of Complex Systems. Harvard University Press, 1985
14. 宋健,于景元. 人口控制论. 北京:科学出版社, 1982
15. Weidlich W, Hagg G. Concepts and Models of a Quantitive Sociology. Springer, 1981

第8章 复杂适应系统理论及其应用

1. 霍兰 J H. 隐秩序. 周晓牧等译. 上海:上海科技教育出版社, 2000
2. Waldrop M M. Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. New York: Simon and Schuster, 1992
3. (美)刘易斯·托马斯. 细胞生命的礼赞. 李绍明译. 长沙:湖南科学技术出版社, 1997

4. (美)刘易斯·托马斯. 水母和蜗牛. 李绍明译. 长沙:湖南科学技术出版社,1998
5. (美)刘易斯·托马斯. 最年轻的科学. 周惠民等译. 青岛:青岛出版社,1996
6. Chen, Y, et al. Two-Liered Architechture of IS in WWW Environment. In: Rolland C, et al. ed. Information Systems in the WWW Environment. London: Chapman & Hall, 1998. 239 ~ 257
7. 克鲁格曼 P. 萧条经济学的回归. 朱文辉等译. 北京:中国人民大学出版社,1999
8. Arthur W B, et al. eds. The Economy As an Evolving Complex Systems. Addison-Wesley, Vol I, 1988, Vol II,1997
9. Holland J H. Emergence. Addison-Wesley, 1998

第9章 开放的复杂巨系统

1. Weaver W. Science and Complexity. Scientist, 1948, 36(4):536 ~ 544
2. 简单性与复杂性都是模糊概念,外延为没有明确界限的模糊集合。在简单性科学与复杂性科学的对象领域之间不存在截然分明的界限。在各自的模糊集合的“核”即典型对象范围内,简单性和复杂性具有各自的规定性,不可混淆。但在两个集合的交叉过渡段界限是模糊的,简单性同复杂性的区分是相对的,同样的对象有时应当看作简单性,有时应当看作复杂性,需要具体问题具体分析。
3. (美)霍根 J. 科学的终结. 孙雍君等译. 呼和浩特:远方出版社,1997. 329
4. (美)西蒙 H. 人工科学. 武夷山译. 北京:商务印书馆,1987. 166 ~ 197
5. 普利高津 I. 从存在到演化. 自然杂志,1980,(2)
6. (美)盖尔曼 M. 夸克与美洲豹. 杨建邺等译. 长沙:湖南科学技术出版社,1997. 55
7. 钱学森. 要从整体上考虑并解决问题. 光明日报,1990-12-30
8. 见:许国志主编. 系统研究. 杭州:浙江教育出版社,1996. 125
9. 王寿云,于景元,戴汝为,汪成为,钱学敏,涂元季. 开放的复杂巨系统. 杭州:浙江科学技术出版社,1996. 286
10. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 32
11. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 270
12. Hewitt C, Inman J. DAIBetwixt and Between; From “Intelligent Agents” to Open System Science, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1991, 21:6
13. 列宁. 什么是“人民之友”以及他们如何攻击社会民主党人? 见:列宁选集(第一卷). 北京:人民出版社,1995. 8
14. 钱学森,孙凯飞,于景元. 社会主义文明的协调发展需要社会主义政治文明建设. 政治学研究,1985,(5)
15. 恩格斯致康·施米特. 见:马克思恩格斯选集(第四卷). 北京:人民出版社,

1995. 701

16. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 419
17. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 164
18. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 32
19. 王寿云. 增订版说明. 见:钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 2
20. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 520~521
21. 钱学森. 在香山科学会议第68次学术讨论会上的书面发言. 见:张焘主编. 科学前沿与未来(第三集). 北京:科学出版社,1998. 1
22. 钱学森. 开放的复杂巨系统的科学技术. 中国系统工程学会简报,1995
23. 钱学森. 基础科学研究应该接受马克思主义哲学的指导. 哲学研究,1989,(10)
24. 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志,1990,13(1):3~11

第10章 技术科学层次的系统科学

1. 钱学森. 工程控制论,序. 北京:科学出版社,1958
2. 维纳 N. 控制论. 郝季仁译. 北京:科学出版社(第二版),1963. 8
3. 曾庆存近年来提倡的自然控制论所要研究的对象,多半也属于开放的复杂巨系统的控制问题。
4. 钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 178
5. 许国志. 论事理. 见:系统工程论文集. 北京:科学出版社,1981
6. 张锡纯. 工程事理学发凡. 北京:北京航空航天大学出版社,1997
7. 钱学森致张锡纯的信,引自《工程事理学发凡》前言3~5页。
8. Gu J F, Zhu Z C. The Wuli-Shili-Renli Approach (WSR), An Oriental Systems Methodology. In: Systems Methodologies: Possibilities for Cross-cultural Learning and Integration. The University of Hull, UK, 1995
9. 维纳 N. 控制论. 郝季仁译. 北京:科学出版社(第二版),1963. 133
10. 钱学森致张锡纯的信,引自《工程事理学发凡》。
11. 庞元正,李建华编. 系统论控制论信息论经典文献选编. 北京:求实出版社,1989. 508
12. 钱学森. 工程控制论. 北京:科学出版社,1958
13. 藤田宏一. 基础信息论. 魏鸿骏等译. 北京:国防工业出版社,1982
14. 许国志主编. 系统研究. 杭州:浙江教育出版社,1996

第 11 章 系统科学的工程技术

1. 钱学森,许国志,王寿云. 组织管理的技术——系统工程. 见:钱学森等. 论系统工程(增订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 7~27
2. Pryor R J, et al. Development of Aspen: A Microanalytic Simulation Model of the U. S. Economy. SAND 96-0434, 1996
3. 谭跃进,陈英武,易进先. 系统工程原理. 长沙:国防科技大学出版社,1999
4. 汪应洛. 系统工程理论、方法与应用. 北京:高等教育出版社,1992
5. Swenson, R. Emergent Attractors and the Law of Maximum Entropy Production: Foundation to a Theory of General Evolution. Systems Research, 1983, 6(3):187~197
6. Sage A P, ed. Systems Engineering: Methodology and Application. John Wiley, 1977
7. Checkland P B. Systems Thinking, Systems Practice. Chichester: John Wiley and Sons, 1981
8. Winner R. The Role of Concurrent Engineering in Weapon System Acquisition. IDA Report-338 AD-A203/615, 1988
9. 王寿云,于景元,戴汝为,汪成为,钱学敏,涂元季. 开放的复杂巨系统. 杭州:浙江科学技术出版社, 1996
10. 周曼殊主编. 农业系统动力学. 济南:山东科学技术出版社,1988. 320~381

结语

1. 王寿云,于景元,戴汝为,汪成为,钱学敏,涂元季. 开放的复杂巨系统. 杭州:浙江科学技术出版社,1996. 62
2. Cowan G A, Pines D, Meltzer D, eds. Complexity: Metaphors, Models, and Reality. Addison-Wesley, 1994
3. 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志,1990,13(1):3~11
4. (美)国家研究理事会. 美国国家科学教育标准. 戴守志等译. 北京:科学技术文献出版社,1999. 139~143

后 记

1998年8月中国系统工程学会常务理事会决定把编写本书列为学会的工作,并由我们负责具体编写,对我们来说,既很荣幸,也深感责任重大。在众多同志的关心支持下,经过整整一年半的努力,终于完稿了。

本书编写工作分工如下:第1章,车宏安;第2、第3章,苗东升;第4、第5章,谭跃进;第6、第7章,姜璐;第8章,陈禹;第9章,车宏安、苗东升;第10章,苗东升;第11章,谭跃进;结语,车宏安。全书由车宏安、姜璐统稿。

本书虽是分工编写的,但从确定编写大纲到分工执笔,经过了多次集体讨论,相互审阅,相互修改,可以说每一章都是集体努力的共识性成果。本书内容经2000年2月10日评审组审议后,作了较大的修改、充实和调整。

于景元研究员与作者就提纲、内容等多次进行了讨论,特别专门为第9章写了详细的具体意见,并为第11章提供了具体资料,我们都采用了;郑应平教授、史定华教授仔细审阅过部分章节,提出了宝贵意见;朱照宣教授一直关心本书的编写和出版,给予了多方面的大力支持;方福康教授、范文涛研究员、陈光亚研究员、经士仁研究员、柳克俊教授始终热情关注本书的编写,参加过多次讨论,我们对以上专家表示衷心感谢!我们感谢上海科技教育出版社对本书出版给予了大力支持,感谢上海科技教育出版社编辑潘涛同志,他从本书的酝酿到最后的出版,都给予了热情的支持,并对本书进行了精心编辑加工,使本书大为增色。感谢朱广田研究员的热情关注和支持。感谢熊辉、饶京海参加部分章节的工作。我们向评审组专家及所有关心和帮助本书编写工作的同志表示深切的感谢和敬意!

本书参考了大量文献资料,各章节直接引用的文献有些未能一一注明,我们在此向有关作者一并致谢。

限于我们的水平,以及对许多方面还缺乏深入的调查研究,书中的疏漏、错误和不当之处一定不少,恳请读者批评指正,以便修订再版。

作者

索引

L-系统 L-system 128 ~ 130, 366

A

阿克罗夫模型 Akerlof model 271 ~ 274

阿罗 Arrow, K. J. 10, 250

阿尼斯定理 Hanusse theorem 216

阿瑟 Arthur, W. B. 10, 250

阿什比 Ashby, W. R. 31

埃农迭代 Hénon iteration 108 ~ 110, 112

艾根 Eigen, M. 9, 32, 342

艾根-舒斯特模型 Eigen-Schuster model
127

安德森 Anderson, P. W. 10, 250

鞍点 saddle 57, 61, 63, 65, 66, 84, 218

鞍结分岔 saddle-node bifurcation 75, 76

B

白箱 white box 323, 324, 333, 365

贝尔曼 Bellman, R. 338

贝纳尔对流 Bénard convection 177,
179, 185, 197, 199

贝纳尔图样 Bénard pattern 19, 178,
185, 187

贝塔朗菲 Bertalanffy, L. von 5, 9, 17,
21, 26, 31, 32, 297, 298, 304, 323, 341,
342, 386

倍周期分岔 period doubling bifurcation
88, 105

比尔 Beer, S. 28, 29, 32

边界 boundary 15, 24, 25, 103, 119, 129,

131, 201, 265, 294, 323, 329, 368

编码 coding 7, 132, 133, 135, 136, 142,
321, 348 ~ 351

编码理论 coding theory 349

扁鹊 1

标度模型 scale model 37

标识 tagging 256, 265, 267 ~ 269, 281

表型 phenotype 128, 132

并行工程 concurrent engineering 356,
358, 361 ~ 364

玻尔兹曼 Boltzmann, L. 208, 209,
211 ~ 213, 297, 342, 352

补偿控制 compensation control 326, 327

不变量 invariant 38, 184, 185

不动点 fixed point 9, 49 ~ 52, 54, 56, 58,
59, 62 ~ 66, 68, 69, 75 ~ 77, 79, 82, 84,
85, 88, 93, 95, 96, 102 ~ 105, 107 ~ 109,
111, 121

不可逆过程 irreversible process 31, 149,
298, 366

不稳定定态 non-stable steady state 53,
57, 58, 72, 75, 83

不稳定性 non-stability 51, 73

布尔网络 Boolean network 95, 98, 122 ~
124, 366

布朗运动 Brownian motion 156, 160, 223

C

参量 parameter 8, 34, 39, 44, 47, 67, 79,
82, 83, 85, 87, 88, 120, 121, 174, 186,

192, 205, 229, 242
 参量空间 parameter space 47, 72 ~ 75, 82, 84, 86, 88, 120, 121
 层次 level 17, 22, 23
 叉式分岔 pitchfork bifurcation 76, 77, 79, 151
 查普曼-科尔莫戈罗夫方程 Chapman-Kolmogorov equation 147
 差分方程 difference equation 39, 126, 367, 368
 超临界分岔 supercritical bifurcation 76
 超循环 hypercycle 9
 超循环理论 hypercycle theory 9, 302
 陈亮 1
 程序控制 program control 324, 325
 初态 initial state 43, 50 ~ 57, 63, 66, 69 ~ 71, 77, 84, 89 ~ 93, 148, 331
 刺激 反应模型 stimulus-response model 249, 256, 260
 从定性到定量综合集成方法 meta-synthesis 310, 311, 316, 318, 333, 340, 376, 378
 D
 达尔文 Darwin, C. 188, 197, 198
 达芬方程 Duffing equation 70, 78, 89, 90, 92
 大成智慧工程 meta-synthetic engineering 313
 大系统 large system 20, 23, 302 ~ 305, 327, 328, 334
 戴汝为 295
 丹齐格 Danzig, G. B. 338
 倒分岔 inverse bifurcation 106, 107
 德谟克利特 Democritus 1

等概率假设 postulate of equal *a priori* probabilities 209, 221
 等级层次 hierarchy 298
 迪拉克判据 Dulac criteria 69
 笛卡尔 Descartes, R. 33
 地图模型 map model 37
 递阶控制 control hierarchy 327, 328
 迭代 iteration 38, 95, 96, 99, 100, 103, 105, 108 ~ 115, 121, 128, 131, 134, 199, 225, 290, 291, 365, 369
 叠加原理 superposition principle 9, 41, 42, 190, 192, 203, 204, 206, 207, 209 ~ 212
 定态 steady state, stationary state 47 ~ 51, 53, 57, 59, 61 ~ 65, 68, 72, 74 ~ 77, 79 ~ 83, 86, 88 ~ 91, 111, 113, 114, 148, 149, 151, 204
 动态系统 dynamic system 28, 29, 35, 39, 47 ~ 49, 51, 52, 60, 61, 64, 66, 67, 69, 72 ~ 74, 77, 79, 125, 127, 332
 对策论 game theory 285, 292
 对称破缺 symmetry-broken 80, 158, 182 ~ 184
 对称性 symmetry 76, 126, 127, 173, 182 ~ 185, 232
 多样性 diversity 79, 253, 255, 256
 多主体系统 multi-agent systems 137
 E
 恩格斯 Engels, F. 2, 3, 308
 F
 范胜之 1
 反馈 feedback 6, 15, 162, 175, 176, 225, 263, 327, 330

- 反馈控制 feedback control 6, 7, 171, 326, 327
- 范德波尔方程 van der Pol equation 67, 68, 70, 127, 193
- 防御标识 defense tags 267 ~ 269
- 非平衡定态 nonequilibrium steady state 190
- 非平衡态 nonequilibrium state 34, 209, 211, 222, 300
- 非线性 nonlinearity 8 ~ 10, 18, 30, 36, 41, 42, 45 ~ 47, 58, 59, 62, 65 ~ 68, 70, 74, 79, 80, 85 ~ 87, 90, 91
- 非线性科学 nonlinear science 9, 10, 300, 334, 385
- 非线性系统 nonlinear system 41, 44 ~ 47, 58, 59, 65 ~ 68, 74, 80, 85, 86, 109, 115, 301
- 非游荡集 nonwandering set 71, 72
- 非自治系统 non-autonomous system 45
- 费根鲍姆 Feigenbaum, M. J. 32, 45, 105, 107
- 费根鲍姆数 Feigenbaum number 105, 107
- 分岔 bifurcation 9, 66, 72 ~ 80, 82 ~ 88, 95, 103 ~ 107, 127, 128, 151, 152, 225, 300, 340
- 分界线 separatrix 65, 82, 84, 85
- 分形 fractal 32, 50, 65, 87, 90, 93, 115, 117, 130, 131, 301
- 分形几何 fractal geometry 115, 301
- 分形吸引子 fractal attractor 87, 93
- 分支 branching 76, 77
- 封闭性 closeness 25
- 冯·诺伊曼连接 von Neumann connection 118
- 符号动力学 symbolic dynamics 101 ~ 103
- 福克尔-普朗克方程 Fokker-Planck equation 152 ~ 159
- 负反馈 negative feedback 176, 180, 255
- 复杂巨系统 complex giant system 11, 12, 23, 35, 36, 38, 39, 203, 211, 235, 247, 297, 299, 301 ~ 307, 309 ~ 312, 314 ~ 318, 322, 330, 333, 335, 340, 352, 356 ~ 358, 385, 386
- 复杂适应系统 complex adaptive system 10, 249, 252, 253, 255, 263, 266, 292, 294, 297, 298, 385
- 复杂系统 complex system 3, 8, 10 ~ 12, 22 ~ 24, 26, 29, 33, 39, 74, 98, 118, 145, 157, 162, 173, 182, 192, 196, 235, 236, 249, 251, 252, 254 ~ 256, 258, 260, 261, 269, 270, 290 ~ 298, 301 ~ 303, 323, 334, 340, 342, 357, 364, 366, 367, 369, 372, 385
- 复杂性 complexity 10, 16, 22 ~ 24, 44, 47, 108, 160, 162, 169, 188, 250 ~ 253, 255 ~ 258, 269, 294, 297 ~ 303, 307, 312, 315, 318, 332, 333, 335, 340, 357, 371, 372, 386
- 复杂性研究 complexity study 9 ~ 11, 250, 252, 256, 297 ~ 299, 314, 386
- 傅里叶 Fourier, J. 30
- G
- 盖尔曼 Gell-Mann, M. 10, 250, 298, 306
- 概率测度熵 probability metric entropy 210, 211, 213
- 概念模型 conceptual model 37, 340, 361
- 格林定理 Green's theorem 69

- 功能 function 5, 8 ~ 11, 14, 16, 17, 20, 23, 26, 27, 29, 30, 36, 37, 39, 51, 53, 66, 119, 125, 127, 128, 132, 151, 160, 161, 169, 176, 179, 181, 182, 187, 188, 196, 197, 199, 200, 201, 208, 215, 256, 260, 262, 266 ~ 271, 278, 280, 293, 294, 302, 304, 305, 309, 316, 319, 321, 323, 328 ~ 330, 332, 337, 342, 349, 355, 357, 362, 363, 368, 377 ~ 380, 382, 386
- 功能结构 function structure 26, 27, 169, 187, 188
- 孤立系统 isolated system 8, 188 ~ 190, 213, 221
- 古德 Goode, A. H. 8
- 关联 correlation 23, 24, 26, 29, 36, 39, 52, 72, 73, 150, 156, 229, 230, 232, 265, 270, 304, 336, 337, 361, 376
- 关联函数 correlation function 156, 340
- 关系 relation 1 ~ 3, 5, 7, 12, 13, 18, 20, 24 ~ 27, 29, 31, 37, 38, 41 ~ 44, 48, 50, 53, 58, 60, 63, 66, 67, 93, 97, 103, 116, 122 ~ 125, 155, 159, 163, 166, 170, 173 ~ 175, 177 ~ 181, 183 ~ 185, 188, 190, 194 ~ 197, 199, 201, 203, 204, 206 ~ 212, 214, 217, 219, 220, 222, 224, 229 ~ 232, 236, 237, 239, 241, 244, 245, 247, 255, 258, 259, 261, 270, 271, 276, 281, 282, 284, 294, 298, 303 ~ 305, 307, 309, 313, 318, 319, 329, 330, 332, 333, 336, 338, 342, 345, 346, 351 ~ 355, 361, 363, 365 ~ 369, 372 ~ 374, 376, 386
- 管理科学 management science 5, 7, 8, 11, 174, 314, 359, 374
- 管子 1
- 规则发现 rule discovery 260, 265
- 轨道 orbit 47 ~ 57, 60 ~ 69, 71, 72, 87, 88, 90 ~ 93, 123, 156, 167, 174, 183, 204, 206, 239
- 轨道稳定性 orbit stability 53
- 过程 process 1 ~ 3, 7, 9 ~ 11, 15, 20, 22, 27, 30 ~ 32, 39, 50, 51, 62, 70, 71, 74, 77, 79, 91 ~ 93, 96, 117, 119, 121 ~ 123, 127 ~ 129, 131 ~ 137, 139 ~ 142, 151, 153, 154, 156, 159, 167 ~ 171, 173 ~ 176, 179, 188 ~ 192, 194, 196 ~ 202, 204, 208, 209, 214 ~ 216, 218, 220, 222, 223, 229, 233, 236, 246, 249, 252 ~ 265, 276 ~ 278, 281 ~ 286, 290 ~ 295, 297 ~ 299, 305, 312, 313, 315, 322 ~ 326, 328, 330 ~ 334, 336, 338, 340, 342, 343, 345, 348, 350, 351, 354, 358, 360, 362 ~ 369, 371, 373, 378, 380, 385 ~ 387
- 过渡过程 transient process 70, 91 ~ 93, 330
- 过渡混沌 transient chaos 93
- H
- 哈肯 Haken, H. 8, 9, 12, 32, 189, 192, 194, 196, 202, 203, 220, 239, 298, 304, 342, 386
- 哈特利 Hartley, R. V. L. 341, 343
- 郝柏林 295
- 耗散结构 dissipative structure 7, 9, 10, 32, 34, 182, 185 ~ 187, 189 ~ 192, 199, 298, 300, 352, 366
- 耗散结构理论 dissipative structure theory 8 ~ 10, 32, 182, 187, 189, 191, 366
- 耗散系统 dissipative system 62, 87, 90
- 赫拉克利特 Heraclites 20
- 黑格 Hagg, G. 152, 239

- 黑箱 black box 324, 332, 365
- 宏观量 macroscopic quantity 159, 194, 222, 224
- 宏观态 macroscopic state 149
- 宏观系统 macrosystem 14, 249, 252, 259, 267
- 华罗庚 10
- 还原论 reductionism 3, 10, 12, 32 ~ 34, 250, 253, 254, 258, 259, 298, 299, 302, 313, 318
- 环境 environment 1, 8, 10, 11, 23 ~ 29, 33, 36 ~ 38, 51, 62, 63, 74, 80, 131, 132, 136, 151, 159, 172, 175 ~ 177, 179, 180, 185, 186, 197, 198, 200 ~ 202, 230, 237, 238, 249, 251 ~ 256, 258, 262, 264, 266, 270, 272, 275, 281, 284, 293, 304, 305, 309, 329, 330, 356, 363, 376, 377
- 环面 torus 50, 61 ~ 65, 77, 79
- 灰箱 grey box 324, 365
- 回归性 recurrence 66, 71, 72, 90
- 回声模型 Echo Model 266 ~ 269
- 汇 sink 63, 365, 366
- 混沌 chaos 9, 32, 36, 62, 65, 70, 86 ~ 88, 90, 91, 93, 103, 105 ~ 107, 114, 119, 123, 126, 300 ~ 302, 334
- 混沌边缘 edge of chaos 62, 65, 297
- 混沌运动 chaotic motion 62, 70, 86 ~ 88, 91, 300, 301
- 霍尔 Hall, A. D. 8, 358, 360, 370
- 霍尔三维结构 Hall three dimensions structure 358, 360, 370
- 霍兰 Holland, J. 21, 131, 137, 139, 144, 249, 250, 252, 253, 255 ~ 257, 260, 266, 268, 269, 294
- 霍普夫分岔 Hopf bifurcation 77
- J
- 积木 building block 5, 137, 140, 144, 253, 256, 257, 265
- 基因型 genotype 128, 132
- 基于计算机的模型 computer-based model 39
- 极限环 limit cycle 3, 9, 49 ~ 51, 56, 57, 61 ~ 68, 70, 77 ~ 79, 92, 93, 216, 218, 246
- 尖拐 cusp 81 ~ 83, 85
- 尖拐突变 cusp catastrophe 81, 83, 85, 158, 195, 220
- 简单巨系统 simple giant system 11, 12, 23, 35, 36, 188, 191, 196, 203, 206 ~ 208, 210 ~ 214, 218, 223 ~ 225, 232, 234 ~ 236, 239, 246, 247, 301, 304, 305, 318, 385
- 简单系统 simple system 11, 22, 23, 26, 29, 33, 35, 36, 38, 201, 203 ~ 207, 297, 299, 303, 305, 335
- 渐近稳定性 asymptotically stability 96, 103
- 蒋正华 295
- 交换 crossover 131 ~ 136, 138 ~ 140, 142, 144, 264, 267 ~ 269, 290, 291, 294
- 焦点 focus 54, 61 ~ 63, 65 ~ 67, 77, 84, 85, 92, 216
- 结点 node 54, 56, 61 ~ 63, 65, 75, 85, 92, 97, 98, 123, 170, 216
- 结构 structure 4, 5, 9, 11 ~ 13, 18, 19, 21 ~ 23, 27, 37, 38, 51, 72, 85, 91, 98, 119, 169, 173, 185, 186
- 结构稳定性 structure stability 4, 9, 73, 72
- 进攻标识 offence tags 267 ~ 269

浸渐消去法 adiabatic elimination 196,
200

静态 quiescent state 120, 121

静态系统 static system 28, 39, 41

久期项 secular term 226, 227

局部稳定性 local stability 54, 59

局部线性化 local linearization 46, 65

局域平衡理论 local equilibrium theory
213

巨系统 giant system 11, 12, 23, 35, 36,
203, 206 ~ 208, 211 ~ 214, 224, 225,
234 ~ 236, 247, 299, 302 ~ 305, 307,
311, 312, 318, 357, 385

聚集 aggregation 253 ~ 256

K

卡尔曼 Kalman, R. E. 334

卡斯蒂 Casti, J. 250

开尔文 Kelvin, W. T. 341

开放的复杂巨系统 open complex giant
system 12, 38, 211, 247, 297, 299,
302, 304 ~ 307, 309 ~ 311, 314, 316 ~
318, 322, 330, 333, 335, 340, 356, 358,
385, 386

开放系统 open system 125, 190, 247, 304

开放性 openness 25, 301, 304, 305, 318,
342, 376

康托尔集 Cantor set 116

考恩 Cowan, G. 249, 250, 386

考夫曼 Kauffman, S. 122, 124, 166,
171, 172, 250

科恩-格罗斯伯格方程 Cohen-Grossberg
equation 127

科尔莫戈罗夫熵 Kolmogorov entropy
211

可观测性 observability 335

可加规则 additive rules 118

可控性 controllability 335

可逆规则 reversible rules 118

可逆过程 reversible process 31, 30, 149,
298, 366

克拉克 Clark, J. W. 127

克劳修斯 Clausius, R. J. E. 188, 208

克鲁格曼 Krugman, P. 285

空间结构 spatial structure 20

控制参量 control parameter 22, 38, 39,
43, 44, 48, 64, 68, 72, 73, 75, 76, 78 ~
88, 93, 103, 151, 235, 239, 304, 333, 338

控制策略 control strategy 325 ~ 327

控制空间 control space 48, 87

控制理论 control theory 36, 175, 179,
235, 321, 329, 330, 333 ~ 335

控制论 cybernetics 5 ~ 8, 12, 31, 174,
175, 200, 202, 297, 302, 304, 321 ~ 323,
329, 330, 332, 334, 355

控制任务 control task 324, 325, 327, 331

控制向量 control vector 44, 338

跨临界分岔 transcritical bifurcation 75

快变量 fast variable 9, 192 ~ 194, 196

L

莱特 Light, J. 216

兰顿 Longtin, C. 120, 121, 250

朗之万方程 Langevin equation 155 ~
159, 224

老子 1, 21

勒斯勒尔 Rössler, O. 88, 91

勒斯勒尔方程 Rössler equation 88

勒斯勒尔吸引子 Rössler attractor 91

离散混沌 discrete chaos 95, 102, 103

离散映射 discrete mapping 95~97, 102
 李冰 1
 李雅普诺夫函数 Liapunov function
 60~61, 68, 127
 李雅普诺夫稳定性 Liapunov stability
 53, 60~62
 连续系统 continuous system 44, 51, 86,
 119, 270, 366~368
 两人对策 two-person game 284
 列宁 Lenin, V. 307, 308
 林德斯泰特 Lindstedt, A. 228
 林德斯泰特-庞加莱方法 Lindstedt-
 Poincaré method 228
 林登迈尔 Lindemayer, A. 128
 临界点 critical point 9, 26, 76, 77, 151,
 191, 366
 临界慢化 critical slowing-down 151
 流 flows 48, 190, 255
 鲁棒性 robustness 331, 334
 逻辑模型 logical model 37
 逻辑斯蒂方程 Logistic equation 102,
 103, 105, 108, 237~239
 洛伦茨 Lorenz, E. N. 87, 88, 90, 91
 洛伦茨方程 Lorenz equation 87, 88
 洛伦茨吸引子 Lorenz attractor 87, 88, 91
 洛特卡-沃尔泰拉模型 Lotka-Volterra
 model 103, 127, 215, 229

M

马宾 311
 马尔可夫过程 Markov process 147, 148,
 223, 256, 307~310, 313
 马克思 Marx, K. 3, 13, 32, 307
 麦考尔 Machal, R. E. 8
 麦克斯韦 Maxwell, J. G. 334

慢变量 slow variable 9, 192, 193, 195,
 196
 芒德布罗 Mandelbrot, B. 32, 301
 芒德布罗雪花 Mandelbrot snowflake
 116, 117
 模式定理 scheme theorem 137, 139, 140
 模型 model 4, 6, 7, 16, 18, 31, 36~39,
 41, 42, 46, 65, 70, 76, 83, 88, 95, 97, 98,
 101~103, 117, 119, 121, 125, 127, 134,
 136, 137, 140, 145, 148, 152, 154, 159,
 160~164, 166, 169~172, 191, 198,
 204, 206, 207, 213~216, 218~220,
 222~225, 229, 230, 235~240,
 243~247, 249, 251, 253, 256, 257, 260,
 265~282, 284~292, 294, 300~302,
 311, 322, 327, 331~334, 337~340,
 345, 351, 356, 357, 359, 360, 361, 363~
 372, 374, 376, 377, 379, 381, 386
 莫尔斯 Morse, P. M. 339
 莫利斯 Morris, C. 5
 目的性 teleonomy 5, 61, 62, 353, 354
 穆尔连接 Moore connection 118

N

内部模型 internal models 253, 256, 257,
 265
 纳维-斯托克斯方程 Navier-Stokes
 equation 179
 奈奎斯特 Nyquist, H. 341
 拟周期态 quasi-periodic state 50
 牛顿 Newton, I. 30, 34, 35, 105, 175,
 203~207, 235, 340

P

排斥子 repeller 63, 66, 93, 105

庞加莱 Poincaré, H. 34, 45, 53, 69, 228
 庞加莱-本迪克松定理 Poincaré-Bendixson theorem 69

配分函数 partition function 221, 222

平衡定态 equilibrium steady state 190

平衡态 equilibrium state 8, 19, 92, 149, 188, 190, 191, 209, 221, 222, 300, 301

普朗克 Planck, M. 4, 45, 152, 155 ~ 157, 159, 223, 224, 232 ~ 234

普利高津 Prigogine, I. 8, 9, 32, 34, 74, 187, 189, 190, 198, 202, 203, 206, 224, 298, 300, 304, 342, 352, 386

普鲁辛凯维奇 Prusinkiewicz, P. 131

Q

齐拉 Szilard, L. 343

奇怪吸引子 strange attractor 62, 63 ~ 65, 77 ~ 79, 87, 88, 90, 91

钱学森 10 ~ 14, 23, 32, 34, 62, 297, 299, 302, 304, 305, 307, 308, 310, 311, 313, 316, 318, 319, 321, 330, 332, 334 ~ 336, 339, 340, 342, 351, 355, 358

强迫系统 forced system 44, 45, 69, 70, 89, 93

切克兰德 Checkland, P. 8, 32, 340, 358, 360, 361

丘奇曼 Churchman, C. W. 32

权重动力学 weight dynamics 126

R

染色体 chromosome 131 ~ 136, 138 ~ 140, 142 ~ 144, 261, 263, 293

热寂 heat death 188

热力学分支 thermodynamic branch 26

热力学极限 thermodynamic limit 207

热力学熵 thermodynamic entropy 209, 365

人工生命 artificial life 121, 131, 250

人机结合 310, 312 ~ 317, 357, 376, 378

容量维数 capacity dimension 115 ~ 117

揉面变换 kneading transformation 111, 112

S

熵 entropy 6, 188 ~ 191, 208 ~ 213

熵产生 entropy production 190, 365

熵增加原理 principle of entropy increase 188

社会系统 social system 5, 11, 14, 23, 27, 62, 74, 137, 203, 235, 236, 302, 303, 305, 307 ~ 311, 314, 315, 318, 319, 322, 323, 325, 356, 357, 360 ~ 362

神经网络 neural networks 5, 98, 125 ~ 128, 162, 377

圣菲研究所 Santa Fe Institute 7, 10, 11, 249 ~ 251, 269, 270, 292, 293, 295, 297, 300, 315, 385, 386

时间结构 temporal structure 20, 186, 199

时间之矢 arrow of time 30

时空结构 spacetime structure 20, 186

势函数 potential function 68, 74, 81 ~ 83, 85, 151

适应度 fitness 7, 132 ~ 136, 138 ~ 140, 142 ~ 144, 263, 290, 291

适应性主体 adaptive agent 263, 265, 266

受限发生规程 constrained generating procedure 294

舒哈特 Shohat, J. 228

数学模型 mathematical model 3, 6, 18, 37 ~ 39, 41, 42, 198, 213, 214, 225, 238,

- 301, 302, 311, 322, 328, 331 ~ 333, 337 ~ 340, 357, 359, 360, 361, 367, 371, 374
- 双稳态 bistability 83
- 斯威尼, J. Sweeney, J. 285
- 斯威尼, R. Sweeney, R. 285
- 宋健 236, 340
- 随机过程 stochastic process 30, 145 ~ 148, 153, 156, 385
- T
- 他组织 hetero-organization 173 ~ 177, 179, 180, 189, 385
- 梯度系统 gradient system 68
- 条件复制 conditional duplication 268
- 通信 communication 6, 7, 210, 212, 262, 275, 316, 321 ~ 323, 341 ~ 345, 347 ~ 353, 355, 357, 363, 364
- 通用计算机 universal computer 119
- 统计物理熵 statistical physics entropy 188, 209 ~ 211
- 突变 catastrophe 9, 80, 81, 83, 85, 86, 95, 158, 174, 176, 178, 183, 185, 220, 300, 302
- 突变 mutation 131 ~ 139, 142, 144, 197, 198, 264, 290, 291, 294
- 突变论 catastrophe theory 32, 35, 36, 81, 302
- 托马斯 Thomas, L. 254
- 托姆 Thom, R. 9, 32, 35, 62, 81
- 拓扑熵 topological entropy 211
- W
- 瓦格纳 Wagner, H. M. 6
- 王寿云 10, 355
- 微分方程 differential equation 39, 42, 43, 45, 50, 52, 87, 103, 126, 152, 184, 191, 195, 196, 203, 217, 223 ~ 236, 239, 334, 367, 368
- 微观量 microscopic quantity 222
- 微观态 microscopic state 183, 184
- 韦弗 Weaver, W. 31, 297
- 唯象方法 phenomenological method 41, 214
- 维纳 Wiener, N. 6, 31, 323, 334, 341, 342, 386
- 维数 dimension 45, 47, 48, 50, 63, 74, 115 ~ 117, 184
- 位置 site 266, 267
- 魏德利希 Weidlich, W. 152, 239
- 温纳 Winner, R. 362
- 稳定定态 stable steady state 9, 51, 58, 62, 72 ~ 76, 79, 81, 83, 85, 92
- 稳定性 stability 47, 52 ~ 54, 57 ~ 62, 72 ~ 74, 76, 96, 103, 174, 225, 334, 357, 366
- 稳定状态 stable state 73, 100, 192, 196, 197, 199
- 沃尔弗拉姆 Wolfram, S. 119, 120
- 沃克 Walker 166
- 无序 disorder 8, 86, 173, 177, 178, 180 ~ 183, 189, 190, 192, 198, 222, 236
- 无序结构 disorder structure 19, 150
- 吴文俊 312
- 物理—事理—人理 wuli-shili-renli 340
- X
- 西蒙 Simon, H. 21, 298, 335, 373
- 吸引域 domain of attraction 63 ~ 66, 70, 84

- 吸引子 attractor 61 ~ 66, 70, 79, 84, 87 ~ 93, 119, 121 ~ 125, 127, 151
- 席勒 Schiller 246
- 系统 systems 1 ~ 13, 15 ~ 21, 26 ~ 38, 41 ~ 48, 50, 53, 56, 59, 61, 64, 67, 69, 72, 75, 77, 79, 83, 86, 88, 90, 95, 99, 105, 108, 110 ~ 115, 120 ~ 125, 127 ~ 135, 138 ~ 142, 145 ~ 148, 149 ~ 155, 158 ~ 164, 170 ~ 175, 178 ~ 184, 363, 367, 369, 370, 375, 378, 381, 383, 385, 387
- 系统方法 system method 3, 17, 25, 31, 32, 47, 302, 340, 361
- 系统分析 system analysis 5, 7, 8, 32, 36, 38, 331, 332, 356, 359, 366, 369 ~ 373, 379
- 系统工程 system engineering 3, 5, 7 ~ 12, 26, 37, 239, 255, 269, 270, 302, 307, 310, 311, 336, 353, 355 ~ 362, 364 ~ 367, 369, 371, 373 ~ 376, 378
- 系统观(系统论) system outlook 13
- 系统科学 systems science 1, 4 ~ 17, 20 ~ 23, 25 ~ 29, 31 ~ 34, 36 ~ 38, 41, 44, 47, 59, 173, 174, 177, 182, 185, 187, 188, 198, 203, 211, 213, 222, 236, 247, 251 ~ 253, 259, 266, 294, 297, 299, 302, 304, 305, 307, 309, 313, 315, 321 ~ 324, 335, 341, 342, 345, 351 ~ 353, 357, 364, 365, 371, 375, 385 ~ 387
- 系统思想 system thought 1 ~ 5, 7, 8, 10, 21, 34, 259, 298, 303, 305, 322, 334
- 系统学 systematology 11, 16, 23, 32, 48, 52, 74, 80, 81, 197, 297, 302, 311, 316, 321, 330, 334, 339, 342, 352, 355
- 系统综合 system synthesis 36, 331, 332, 359
- 系综 ensemble 202, 221
- 线性稳定性分析 linearized stability analysis 47, 59, 217, 230, 236
- 线性系统 linear system 41, 43 ~ 47, 58, 59, 61, 64 ~ 69, 74, 80, 84 ~ 86, 109, 115, 301, 334
- 相变 phase transition 26, 30, 49, 159, 182, 186, 191, 192, 194, 196 ~ 198, 220, 221
- 相干行为 coherent behavior 152
- 相图 phase portrait 54, 64 ~ 66, 72, 73, 84, 85, 100, 120, 123
- 相序列 phase sequences 265
- 香农 Shannon, C. E. 7, 36, 210, 297, 341, 343, 345, 349, 351, 352
- 小系统 little system 20, 23, 302, 303, 328
- 协同学 synergetics 8 ~ 10, 12, 32, 189, 303, 366
- 信道 channel 7, 341, 347 ~ 350
- 信息 information 7, 341, 342
- 信息论 information theory 5, 7, 31, 36, 297, 321, 341, 342, 345, 347, 350, 351, 355, 385
- 信息熵 information entropy 210, 212, 213, 345
- 信息学 informatics, information science 7, 8, 349, 351, 352
- 信用分派 credit assignment 260 ~ 263
- 信源 source 7, 345 ~ 349, 351
- 行为 behavior 5 ~ 7, 9, 10, 13, 15, 20, 24 ~ 26, 29 ~ 32, 43, 45, 47, 50 ~ 52, 53, 61, 66 ~ 68, 72, 84, 91, 97, 109, 110, 118, 119, 121, 126, 128, 160, 161
- 性能 performance 9, 27, 39, 381, 322,

325, 330, 331, 337, 347, 348, 362, 367,
369, 371, 372

虚拟现实 virtual reality 357, 367

许国志 10, 335, 339, 340, 355

序 order 106, 180

序参量 order parameter 9, 192 ~ 194, 196

选择 selection 131, 133

选择交配 selective mating 268

薛定谔 Schrödinger, E. 4, 342

Y

压迫规则 forcing rules 118

亚里士多德 Aristotle 21

亚临界分岔 subcritical bifurcation 76

演化 evolution 27, 29

演化方程 evolution equation 44 ~ 46,
48 ~ 50, 52, 57, 59, 61, 65, 66, 68, 71 ~
74, 91, 156, 174, 184, 185, 191, 193,
195, 196, 208, 214 ~ 216, 218 ~ 224,
228 ~ 230, 236, 247

杨振宁 16

一般系统论 general system theory 5, 6,
8, 31, 32, 36, 298, 342

移位映射 shift mapping 102

遗传算法 genetic arithmetic 95, 131 ~
140, 142 ~ 144, 250, 260, 261, 263, 264,
266, 275, 278, 279, 284, 285, 288 ~ 292,
294

役使原理 slaving principle 9, 194 ~ 196,
220

译码 decoding 132, 348 ~ 351

涌现 emergence 20 ~ 24, 33, 34, 39, 47,
128, 190, 199, 201, 206, 212, 249, 254,
256, 292, 294, 298, 303, 304, 313, 316,
366

涌现计算 emergent computation 119

涌现行为 emergent behavior 121, 122,
125

涌现性 emergent property 20 ~ 24, 26,
33, 36, 98, 159, 329, 341, 366

游荡集 wandering set 71, 72, 114

有序 order 19, 62, 107, 173, 180 ~ 188,
190 ~ 192, 199 ~ 201

有序结构 ordered structure 8, 9, 19, 73,
182, 186, 187, 189 ~ 192, 201, 216

阈值 threshold 8, 125, 178, 182

元胞自动机 cellular automata 95, 98,
117 ~ 121, 128, 137, 199, 366

元素 element 17 ~ 22, 24, 26 ~ 29, 31,
34 ~ 38, 97, 98, 100 ~ 102, 118, 122,
124, 126, 128, 129, 142, 162, 164, 166,
167, 169 ~ 172, 180, 181, 210, 253, 254,
257, 260, 262, 301 ~ 303, 341, 351, 366,
385

原型 prototype 36 ~ 38, 160, 161, 275,
300, 357

源 source 63

运筹学 operational research 6 ~ 8, 10,
11, 31, 36, 264, 297, 321, 335 ~ 340,
355, 374

Z

暂态 transient state 47 ~ 49, 51, 57, 61,
62, 91, 92

噪声 noise 156, 300, 347, 349 ~ 351

札德 Zadeh, L. A. 301

粘着 adhesion 253, 254

张锡纯 340

涨落 fluctuation 145, 146, 148 ~ 152,
156 ~ 158, 191, 192, 220 ~ 223, 229,

- 232, 240, 304, 366
- 折叠 fold 81 ~ 83
- 振荡 oscillation 9, 51, 54, 56, 66 ~ 70, 88, 92, 126, 176, 186, 189, 199, 200, 216, 245, 300, 332
- 整体建模 ensemble modeling 160 ~ 162, 169, 366
- 整体论 holism 32 ~ 34, 313
- 整体性 wholeness 20 ~ 22, 24, 31, 33, 39, 125, 196, 206, 357, 366
- 整体涌现性 whole emergence 20 ~ 24, 26, 33, 36, 329, 341
- 指标 index 63, 66
- 滞后 hysteresis 77, 83, 245, 304
- 中心点 center 56, 57, 61, 68, 85
- 中心极限定理 central limit theorem 152
- 终态 final state 9, 50, 51, 53, 54, 68, 84, 92
- 重写规则 rewriting rules 128
- 周期态 periodic state 49, 50, 86, 92, 114, 300
- 骤变 sudden change 80
- 主方程 master equation 145, 152, 155, 159, 223, 224, 241
- 主体 active agent 137, 174, 202, 247, 249, 252 ~ 255, 257, 259, 260 ~ 263, 265 ~ 269, 274 ~ 276, 278 ~ 285, 287, 292, 294, 322, 337
- 状态 state 18, 20, 27 ~ 29, 39, 41, 44, 45, 47 ~ 51, 61, 64, 71, 73, 79, 84, 87, 92, 95, 97, 100, 118, 121, 122, 128, 129, 142, 145, 149 ~ 151, 163, 166 ~ 169, 173, 177, 180, 375, 376
- 状态变量 state variable 28, 38, 39, 42, 44, 45, 47 ~ 50, 54, 73, 75, 87, 95, 97, 103, 151, 174, 184, 192, 194, 196, 200, 207, 220 ~ 221, 223, 333, 367, 368, 376
- 状态方程 state equation 39, 333, 368
- 状态矩阵 state matrix 142
- 状态空间 state space 28, 47, 48, 50, 51, 64, 72, 74, 84, 264, 333, 338, 339, 356, 370, 372, 376, 377
- 资源 resource 15, 38, 137, 263, 265 ~ 269, 304, 325, 336
- 资源库 reservoir 267
- 子系统 subsystem 26, 180, 181, 184, 186, 187, 190 ~ 192, 196, 198 ~ 214, 218, 220 ~ 222, 234, 236, 253, 257, 302, 303, 305, 323, 328, 330, 341, 342, 351, 372, 376, 377
- 自创生 self-creation 198, 199, 201, 202
- 自动机 automata 95, 97, 98, 117 ~ 121, 125, 128, 137, 199, 366
- 自动器 automation 97 ~ 99, 118, 122, 124, 125
- 自动器网络 automation networks 95, 97 ~ 101, 117, 119
- 自复制 self-reproduction 121, 199 ~ 202
- 自激振荡 self-excited oscillation 67, 68, 70, 176, 300
- 自生长 self-growth 200 ~ 202
- 自适应 self-adaptation 131, 136, 179, 201, 202
- 自由系统 free system 44, 45, 69, 70, 93
- 自治系统 autonomous system 45, 60, 84
- 自组织 self-organization 9, 173, 174, 176 ~ 180, 189, 190, 192, 194, 196 ~ 203, 216, 239, 253, 256, 293, 297, 298, 300, 302 ~ 304, 342, 366, 385
- 综合集成方法 meta-synthetic methodology

- 235, 247, 310, 311, 313 ~ 318, 333, 358, 375, 376, 378, 385
- 综合集成工程 meta-synthetic engineering 311
- 综合集成研讨厅体系 Hall for Work Shop of Meta-synthetic Engineering 310, 316 ~ 318, 378
- 总和规则 totalistic rules 118 ~ 120
- 总体设计部 department of integrative system design 318, 319
- 最优化 optimization 322, 340, 361
- 最优性原理 principle of optimality 322, 338
- 最优控制 optimal control 325